

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251111002

三元混合工质 R600a+R1150+R50 低温实验研究

王鑫洋¹ 赵军¹ 李帅² 武卫东¹

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 挚量智控生物科技有限公司 济南 250101)

摘要 为了探究碳氢混合工质 R600a/R1150/R50 的制冷性能,基于林德-汉普逊循环制冷原理,搭建实验台进行实验研究,对比分析了三元混合工质的制冷特性。实验结果表明,三元混合工质(R600a/R1150/R50)最佳充注量为 161.8 g/26.2 g/2.0 g 时,运行稳定后节流温度为 $-94.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,箱内环境温度为 $-87.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,制冷量为 22 W, COP 为 0.043。三元混合工质中:随着高温工质(R600a)充注量的增加,回热器性能得到改善使得系统节流温度逐渐下降,排气温度逐渐下降;预冷充分的前提下:当节流前温度未达到 R1150 对应排气压力下的液化温度时,添加 R1150 制冷工质可以降低压比,降低节流温度,增加系统制冷工质流量;由于 R50 制冷工质在常规制冷系统排气压力下液化温度太低,使得添加系统后压比增大,质量流量减小。实验结果对林德-汉普逊循环性能分析以及混合工质充注配比的选择和系统调试方面具有一定的指导意义和参考价值。

关键词 林德-汉普逊循环;低温;混合工质;R600a/R1150/R50

中图分类号: TB661;TB657.3

文献标识码: A

Experimental Study on Ternary Mixed Refrigerant R600a + R1150 + R50 at Low Temperature

Wang Xinyang¹ Zhao Jun¹ Li Shuai² Wu Weidong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. ZhiLiang Intelligent Control Biotechnology Limited Company, Jinan, 250101, China)

Abstract To explore the refrigeration performance of the ternary mixed refrigerant R600a/R1150/R50, an experimental setup was established based on the Linde-Hampso cycle refrigeration principle for experimental research, and the refrigeration characteristics of the ternary mixed refrigerant were comparatively analyzed. The experimental results indicate that when the optimal charging amount of the ternary mixed refrigerant (R600a/R1150/R50) is 161.8 g/26.2 g/2.0 g, the throttling temperature after stable operation is $-94.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, the ambient temperature in the box is $-87.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the cooling capacity is 22 W, and the coefficient of performance (COP) is 0.043. In the ternary mixed working medium, with an increase in the high-temperature working medium (R600a), the performance of the regenerator is improved, and both the throttling temperature of the system and exhaust temperature gradually decrease. Under the premise of sufficient precooling, when the temperature before throttling does not reach the liquefaction temperature under the corresponding exhaust pressure of R1150, the addition of R1150 can reduce the pressure ratio, throttling temperature, and refrigeration flow rate of the system. Because the liquefaction temperature of R50 is too low under the exhaust pressure of a conventional refrigeration system, the pressure ratio increases and the mass flow rate decreases after adding the system. The experimental results have a certain guiding significance and reference value for the performance analysis of the Linde-Hampso cycle and the selection of mixed refrigerant charge ratios and system commissioning.

Keywords Linde-Hampso cycle; low temperature; mixture; R600a/R1150/R50

混合工质节流制冷技术广泛应用于能源、医疗、生物、电子等低温领域,对于混合工质节流制冷而言,突破单一工质的温度限制,可以高效可靠地满足从液氮温区至单机蒸汽压缩制冷下限温区的制冷需求。林德-汉普逊循环(Linde-Hampso cycle)又称为焦耳-汤姆逊制冷机,采用节流效应实现制冷效果,是无需依赖机械膨胀做功的单级压缩循环,相比于

同样采用混合工质的自复叠循环,林德循环结构简单,运行成本低、可靠性高^[1-2]。

国内外众多学者对林德循环制冷机从混合工质组分配比优化、系统部件改造等多方面进行研究。朱军韬等^[3]搭建林德循环实验台,通过改变环境温度($5\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$),分析了林德循环回热器性能,得出不同温度下回热器热端温度与焓差关系以及节流温度和冷

柜内温度变化曲线。Yu Mengqi 等^[4]在焦耳-汤姆逊循环基础上改进为带喷射器的增强型焦耳-汤姆逊循环,并应用于-80 °C低温冷冻机的研究,结果表明改进型循环 COP (性能系数, coefficient of performance)和容积制冷量比基本循环更优。刘嘉瑞等^[5-7]利用碳氢混合工质 R601a/R290/R1150 探究了替代含氟化物混合制冷剂(R600a/R23/R14/R50)的可行性,还提出一种新型混合工质变容型焦耳-汤姆逊制冷循环,对二元烃(R601a/R1150)进行研究。Bai Tao 等^[8-9]基于焦耳-汤姆逊循环采用 R170/R290 二元混合物对-60 °C低温冷冻机进行实验,在 R170 最佳质量分数为 35% 时,获得-60 °C 以下的低温制冷,并分析了低沸点组分 R170 质量分数过高对压缩机运行的影响。C. S. Park 等^[10]提出焦耳-汤姆逊制冷系统使用环保且不可燃的制冷剂混合物,用 CO₂ 混合制冷剂替代传统高 GWP(全球变暖潜值, Global Warming Potential)制冷剂,经热力学分析及遗传算法优化验证 R1234ze (E)/CO₂/R32/R14 可以实现-60 °C 以下制冷的可行性。V. Dasari 等^[11]提出焦耳-汤姆逊制冷机仿真模型,根据模拟结果分析混合物组分对给定部件的影响,以及在给定混合物后选择匹配部件的重要性,还提出毛细管中制冷剂混合物的堵塞会限制给定混合物的最大制冷能力。

综合研究现状,国内外学者对林德-汉普逊循环的研究已经提供了大量实验基础。本文在前人研究基础上,对-86 °C温区进行实验。采用三元碳氢混合工质 R600a/R1150/R50 搭建实验台,研究混合工质各配比下制冷系统的相关性能,增加了-86 °C温区实验研究的数据基础,同时在系统调试上提供实验参考。

1 实验系统搭建

1.1 实验装置

实验系统由压缩机、微通道冷凝器、回热器、毛细管、蒸发器、气液分离器以及保温箱体组成,具体实验装置参数如表 1 所示。

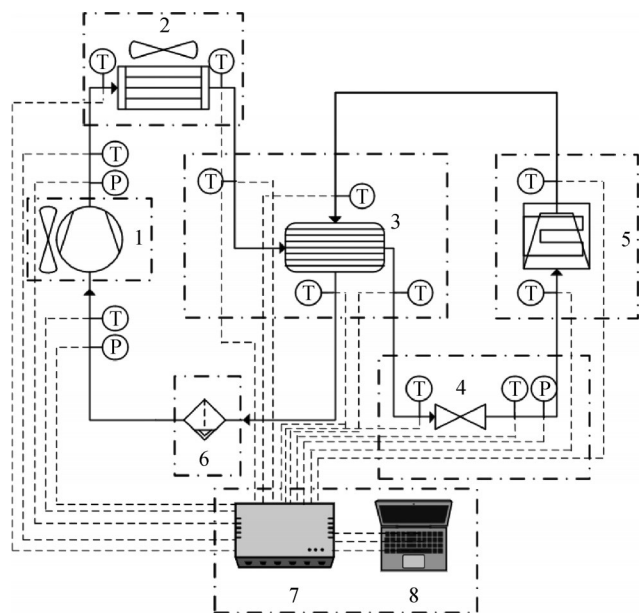
系统流程图如图 1 所示,稳态过程中压缩机排出的制冷工质经微通道冷凝器后流向回热器预冷,再经毛细管节流,由蒸发器吸热;低温低压工质再次流经回热器冷却高压侧制冷工质,然后经气液分离器回到压缩机形成循环。

系统中温度、压力测点位置如图 1 所示,箱体内部中央布置测点监测箱体内部环境温度。在室温(25±1) °C 下进行实验,利用安捷伦数据采集仪每隔 5 s 收集数据。林德-汉普逊循环实验台实物图如图 2 所示。

表 1 实验装置

Tab.1 Experimental apparatus

实验装置	规格/品牌	量程/精度
压缩机	思科普 SC21CL	—
微通道冷凝器	长 268 mm, 宽 20 mm, 高 268 mm	—
回热器	板换 B4×10	—
毛细管	内径 1 mm, 长 3 m	—
蒸发盘管	内径 6 mm, 外径 8 mm, 长 20 m	—
气液分离器	直径 74 mm, 高度 180 mm	0.7 L
保温箱体	长 42 cm, 宽 32 cm, 高 34 cm	43 L
安捷伦	34970A	5 s/次
热电偶	T 型热电偶	-200~260 °C /±0.5 °C
压力传感器	丹佛斯	低压
		-100~1 200 kPa
电子秤	珠恒	高压
		0~3 000 kPa/ ±0.1FS%
		0~30 kg/±0.1 g



1 压缩机; 2 微通道冷凝器; 3 回热器; 4 毛细管; 5 蒸发器; 6 气液分离器; 7 安捷伦; 8 电脑; P 压力传感器; T 温度传感器。

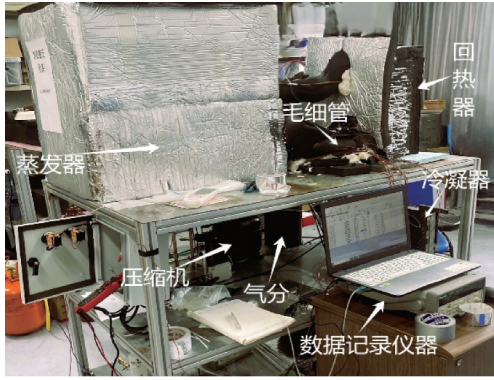
图 1 林德-汉普逊循环实验原理

Fig.1 Experimental principle of Linde-Hampson cycle

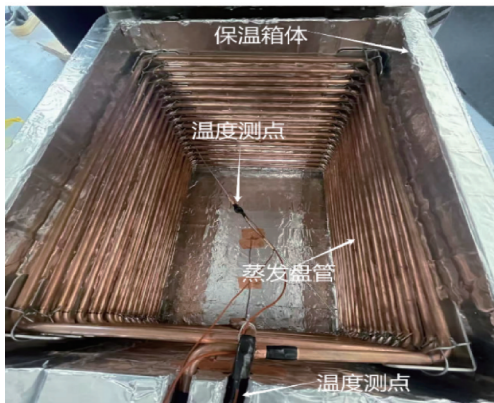
1.2 实验步骤

本实验中高温制冷工质为 R600a, 低温制冷工质为 R1150/R50, 其饱和压力-温度曲线如图 3 所示, 相邻工质之间标准沸点距离在 40~80 K, 理论上三元混合工质 R600a/R1150/R50 可以实现蒸发温度-80 °C 的制冷范围^[12-13]。制冷工质具体参数如表 2 所示。

实验分为 3 组, 按照控制变量法, 每组实验中一



(a) 林德-汉普逊循环实验台



(b) 箱体内部蒸发器

图2 林德-汉普逊循环实验系统实物

Fig.2 Physical diagram of Linde-Hampson cycle experimental system

种制冷工质充注量逐渐递增,直至接近最佳配比 R600a-161.8 g, R1150-26.2 g, R50-2.0 g。最佳配比是经过多次制冷工质添加调试,使系统节流温度达到-90℃以下的充注量。

不同实验组混合工质充注质量如表3所示,每组中的 Mix 项通过单一变量法对制冷工质的充注量进行控制。以组1为例,待 Mix1 项实验测试稳定之后,收集相关数据作为组1待分析数据,同时设备运行过程中添加 R600a 工质至 80.5 g 形成组1中的 Mix2 配比,然后关机,待系统恢复室温时进行下一项实验。这样操作的原因如下:1)以 R600a 为自变量过程中, Mix1 做完实验停机系统复温至常温之后,系统静压大于 300 kPa,此时欲做 Mix2 项时,系统无法继续加入高温制冷工质 R600a,因此,组1各项实验均在上一个 Mix 项实验采集所需数据后,不停机的情况下,压缩机低压管路维持在 100~200 kPa 的状态时加入 R600a 制冷工质,使形成下一 Mix 项配比;2)在添加制冷工质过程中人为误差不可避免,上述方法尽可能保证了每组实验中非自变量制冷工质质量前后一致,使实验更具严谨性。

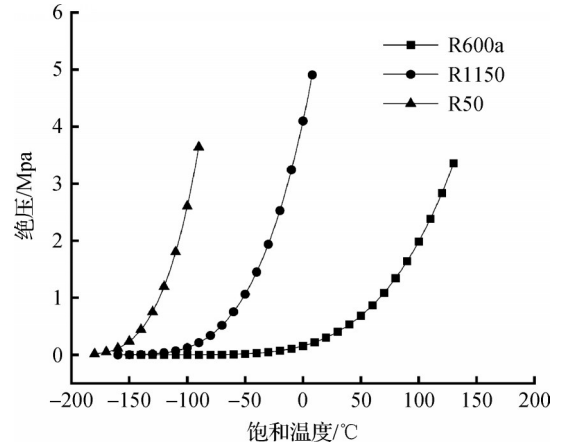


图3 饱和蒸气和温度

Fig.3 Saturated vapor pressure and temperature

表2 制冷工质参数

Tab.2 Refrigerant parameters

工质	$T_{cr}/^{\circ}\text{C}$	p_{cr}/kPa	NBP/ $^{\circ}\text{C}$	ODP	GWP
R600a	134.7	3 629	-11.8	0	~20
R1150	9.2	5 042	-103.8	0	~20
R50	-82.6	4 599	-161.5	0	25

注: T_{cr} 为临界温度; p_{cr} 为临界压力; NBP为标准沸点; ODP为臭氧损耗潜值; GWP为全球变暖潜值。

表3 不同实验组混合工质组元充注质量

Tab.3 The filling quality of mixed working medium components in different experimental groups

实验组别	制冷工质	Mix1 质量	Mix2 质量	Mix3 质量	Mix4 质量
组1	R600a	40.2	80.5	121.2	161.8
	R1150	25.6	25.6	25.6	26.2
	R50	1.8	1.8	1.8	2.0
组2	R600a	159.8	159.8	159.8	161.8
	R1150	6.5	12.6	19.3	26.2
	R50	1.9	1.9	1.9	2.0
组3	R600a	160.3	160.3	160.3	161.8
	R1150	25.8	25.8	25.8	26.2
	R50	0.5	1.0	1.5	2.0

1.3 性能计算及数据不确定度分析

根据实验数据对林德-汉普逊制冷循环系统进行计算,箱内环境的降温速率 V 计算如下:

$$V = \frac{T_0 - T_1}{t} \quad (1)$$

式中: T_0 为前一时刻温度, $^{\circ}\text{C}$; T_1 为后一时刻温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为前后时刻温度点时间间隔, h。计算中选取的2个温度测点间隔时长为1 h。

对于实验系统性能的计算,忽略蒸发器进出口

表4 稳定状态下状态点参数
Tab.4 State point parameters in steady state kJ/kg

实验组别	Mix	排气焓值	吸气焓值	蒸发器进口焓值	蒸发器出口焓值
组1	Mix1	794.1	628.6	252.7	273.1
	Mix2	758.3	600.9	62.7	81.7
	Mix3	728.0	566.8	28.3	36.0
	Mix4	708.8	526.7	13.9	22.1
组2	Mix1	685.3	541.8	59.0	79.2
	Mix2	700.8	545.8	28.5	46.2
	Mix3	712.6	543.0	20.2	30.7
	Mix4	708.8	526.7	13.9	22.1
组3	Mix1	700.3	551.0	30.8	34.2
	Mix2	707.7	553.8	18.3	24.5
	Mix3	709.8	542.2	14.3	22.1
	Mix4	708.8	526.7	13.9	22.1

的压降。其中质量流量 q_m 根据压缩机转速、排气量及吸气状态点密度进行计算,转速及排气量通过思科普官网获得。制冷量 Q_0 、功耗 W_0 和COP通过选取每组实验稳定运行过程中第3~4小时之间的温度及压力数据,结合Refprop 9.0查询状态点焓值、密度等,将3~4 h原始数据每隔400 s再取值,共9个数据计算平均值。系统中排气、吸气、蒸发器进/出口稳定状态下的焓值如表4所示。

质量流量计算:

$$q_m = \frac{rV_h\rho}{3600} \quad (2)$$

式中: q_m 为质量流量,kg/s; r 为压缩机转速,r/h; V_h 为排气量, m^3/r ; ρ 为吸气密度,kg/ m^3 。

功耗及制冷量计算:

$$W_0 = q_m(h_2 - h_1) \quad (3)$$

$$Q_0 = q_m(h_4 - h_3) \quad (4)$$

式中: W_0 为压缩机功耗,kW; Q_0 为制冷量,kW; h_2 为压缩机排气焓值,kJ/kg; h_1 为压缩机吸气焓值,kJ/kg; h_4 为蒸发器出口焓值,kJ/kg; h_3 为蒸发器进口焓值,kJ/kg。

系统能效COP计算:

$$COP = Q_0/W_0 \quad (5)$$

由于测量仪器精度的限制、操作技术的差异等因素,实验结果不可避免地带有不确定性,不确定度分析可以定量评估随机和系统误差,以保证实验结果的可靠性,不确定度采用测量不确定度表示指南进行评估^[14]。假设概率分布均匀,由式(6)~式(8)计算可获得温度和压力等直接测量参数的不确定度,温度不确定度为 $\pm 0.29^\circ\text{C}$,压力的不确定度分别为低

压 $\pm 0.75\text{ kPa}$ 、高压 $\pm 1.82\text{ kPa}$,制冷工质充注的不确定度为 $\pm 0.11\text{ g}$ 。

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (6)$$

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

$$u_B(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

式中: $u_c(x)$ 为标准不确定度; $u_A(x)$ 为不确定度的A类评价,通过对重复观测进行统计分析以获得观测值均方差的统计估计; $u_B(x)$ 为不确定度的B类评价,通过计算假设概率分布的标准定义, a 表示分布的半宽度。

2 实验结果与分析

2.1 不同质量R600a对系统的影响

对组1中的各项实验数据进行分析,如图4~图8所示。由图4可知,随着R600a工质质量的增加,回热器换热性能得到改善,提高了低压侧工质露点温度^[15],使低温工质在回热器中预冷更充分,进而节流温度和箱内环境温度逐渐下降。节流温度与箱体环境温度之间的温差决定着箱体降温速率的大小,图4显示在运行1 h之后,组1中各Mix项节流温度基本达到最低,因此在这段时间内箱内温降速率会出现图5中的极值,随着箱内温度与节流温度温差逐渐缩小,降温速率值也趋于一致。

因为系统中高温制冷工质R600a在回热器中具有关键性的预冷作用,且R600a制冷工质的加入也有助于系统排气温度和排气压力的降低(图6~图7)。随着R600a质量的增加以及节流温度的降低,回热器低压侧会积存更多的液态R600a对回热器高压侧的低温工质(R1150/R50)进行预冷。R600a越多预冷越充分,从而使得稳定之后的节流温度逐渐降低。因此经过蒸发器后回到压缩机吸气口的温度也会逐渐降低(图7)。

系统制冷量和COP如图8所示,Mix1~Mix4的制冷量逐渐降低,这是因为对于一个制冷系统而言,节流温度越低,实际节流前后偏离等焓节流的程度就越大,节流过程中闪发气体量就越多,因此制冷量越小。而COP对比中,Mix4反而升高的现象可从图6中系统吸/排气压力图中进行分析,图6中稳定状态时Mix4和Mix3的吸气压力几乎一致,而排气压力Mix4明显比Mix3偏低(Mix4中高温制冷工质R600a偏多的原因),压缩机做功较少,所以对于COP而言,Mix4反而高于Mix3。

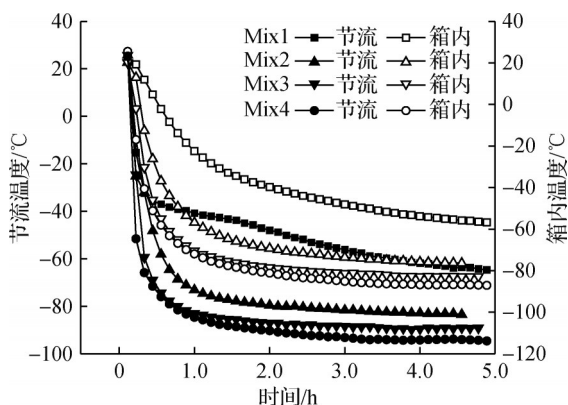


图4 节流温度及箱内环境温度变化(组1)

Fig.4 Variation of throttling temperature and ambient temperature in the box (Group 1)

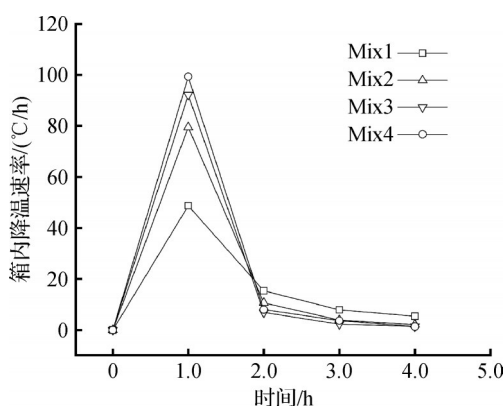


图5 箱内降温速率变化(组1)

Fig.5 Variation of cooling rate in box (Group 1)

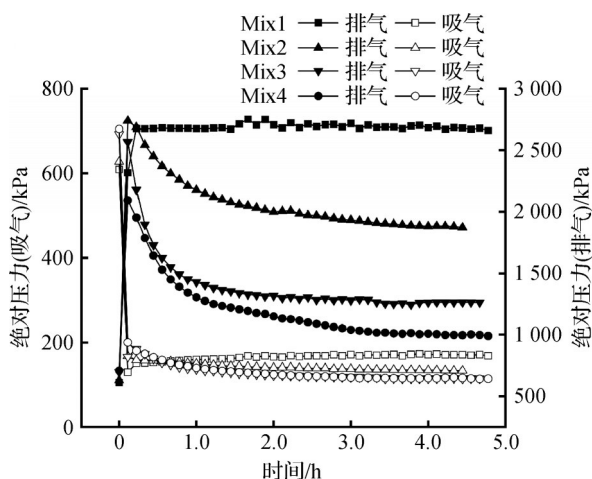


图6 吸排气压力变化(组1)

Fig.6 Variation of suction and exhaust pressure (Group 1)

2.2 不同质量 R1150 对系统的影响

通过组2实验,对比分析了 R1150 不同充注量对于系统的影响,如图9~图14所示。

由图9~图10可知,在高温制冷工质 R600a 足量的前提下,系统回热器中低压侧积存的 R600a 对于高压侧低温工质预冷更充分,系统中加入低温制冷工

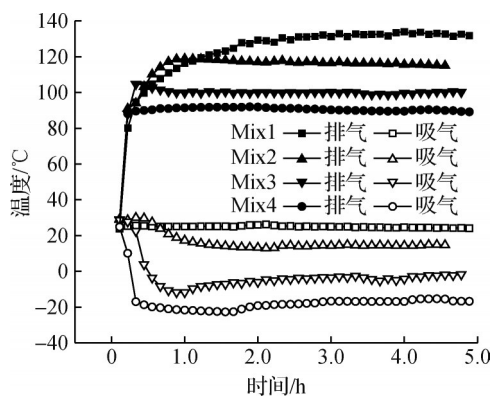


图7 吸排气温度变化(组1)

Fig.7 Variation of suction and exhaust temperature (Group 1)

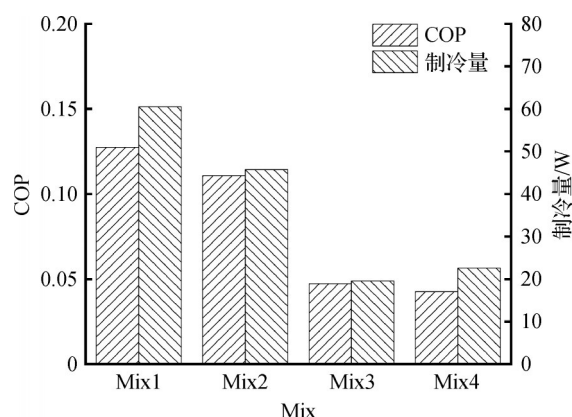


图8 运行稳定制冷量及 COP(组1)

Fig.8 Stable operating cooling capacity and COP (Group 1)

质 R1150 后,节流前被充分预冷,因此每个 Mix 项的节流温度不断降低。对于降温速率的分析同 2.1 节,此处不再赘述。

由图11压力变化分析可知,稳定后的排气压力约为 1 000 kPa;节流后的压力在 150~200 kPa 之间。通过 Refprop 9.0 对 R1150 制冷工质特性进行查询:在压力为 150~200 kPa 时,R1150 的饱和温度在 -104~-91 °C,而实际测得节流温度最低为 -94.6 °C。出现该差异的原因有:1)温度滑移;2)在制冷系统中,多元混合工质在整个工作温区实现热当量匹配后,其所能达到的最大等温节流效应会低于各纯质在其相转变区间的最大等温节流效应^[15]。

吸排气温度变化如图12所示,只有 Mix1 排气温度区分度明显,其余混合项排气温度和吸气温度区分度并不明显。为探究其原因对该组4项实验的压比进行统计如图13所示,随着 R1150 工质的加入,压比逐渐降低。从 Refprop 9.0 对高压侧 R1150 制冷工质特性进行查询:在排气压力为 1 000 kPa 时临界液化温度只有 -51.8 °C。而在组2实验中,原始数据中回热器高压侧的出口温度均已远低于 -51.8 °C,因此

在组2各项实验中,系统高压侧R1150在经过回热器时已经液化,从而使排气压力降低。同时解释了组2中各项实验随着R1150工质的加入压比越来越低的现象。

系统制冷量和COP如图14所示,随着制冷工质R1150的增加总体呈下降趋势。制冷量由40 W降为22 W,COP由0.117降为0.043。

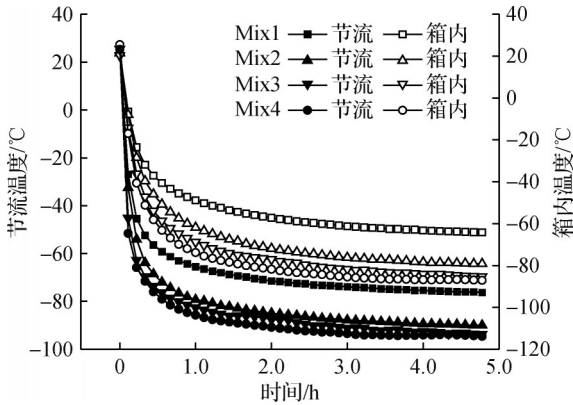


图9 节流温度及箱内环境温度变化(组2)

Fig.9 Variation of throttling temperature and ambient temperature in the box (Group 2)

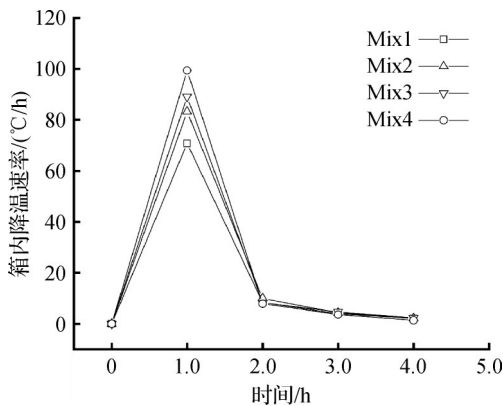


图10 箱内降温速率变化(组2)

Fig.10 Variation of cooling rate in box (Group 2)

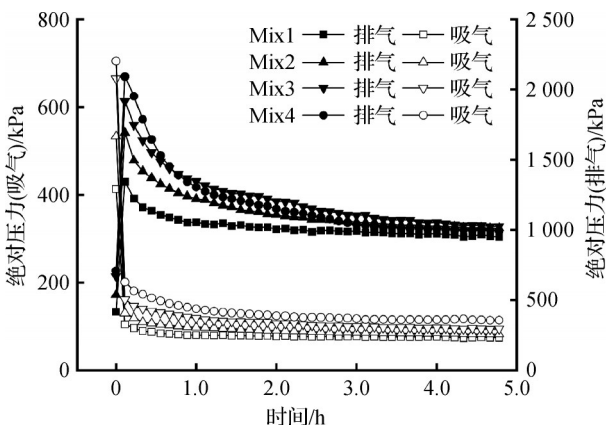


图11 吸排气压力变化(组2)

Fig.11 Variation of suction and exhaust pressure (Group 2)

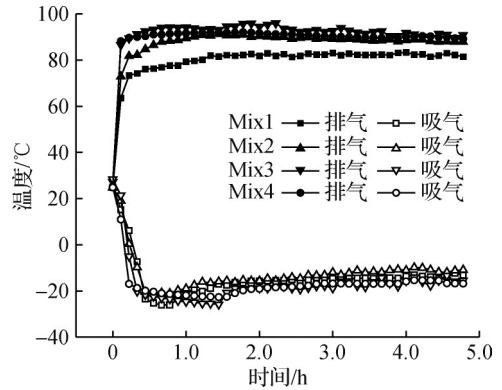


图12 吸排气温度变化(组2)

Fig.12 Variation of suction and exhaust temperature (Group 2)

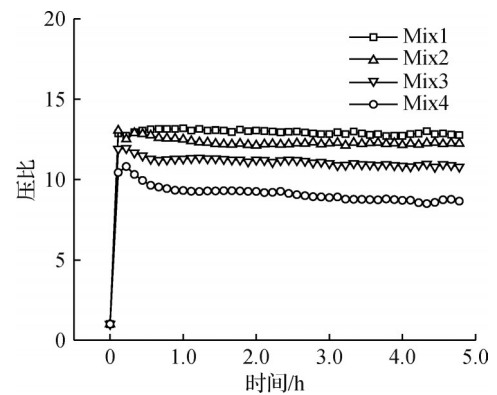


图13 压比的变化(组2)

Fig.13 Variation of pressure ratio (Group 2)

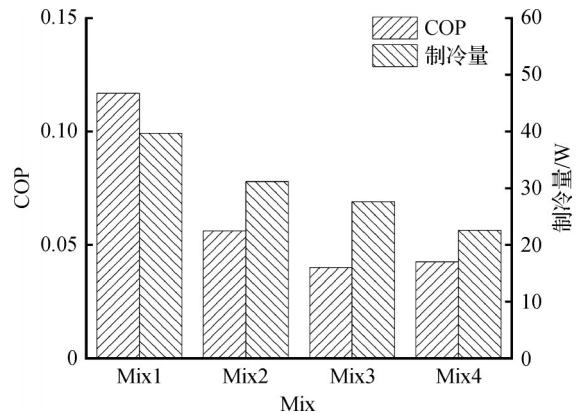


图14 运行稳定制冷量及COP(组2)

Fig.14 Stable operating cooling capacity and COP (Group 2)

2.3 不同质量R50对系统的影响

对组3各项实验数据进行分析如图15~图19所示。图15中节流温度和箱内环境温度仍随着R50的加入而逐渐降低,降幅越来越小,其中Mix3和Mix4稳定后的节流温度接近,各自的降温速率如图16所示,曲线变化规律及分析基本和2.1节、2.2节类似。

对组3中的各项实验压比作对比如图18所示,随着R50工质的加入,Mix1~Mix3压比逐渐增大,

Mix3 和 Mix4 压比接近,说明系统中每个 Mix 项的质量流量越来越小,这与 2.2 节添加 R1150 工质对系统的影响呈现相反的现象。这是因为在 2.2 节,逐渐添加 R1150 过程中,回热器高压侧 R1150 已经液化使得排气压力降低所致;而 2.3 节,逐渐添加 R50 的过程中回热器高压侧经过预冷的 R50 无法液化(图 17 中稳定时排气压力最高为 1000 kPa,对应 R50 临界液化温度为 $-124\text{ }^{\circ}\text{C}$),因此随着 R50 的逐渐添加,会呈现出压比逐渐升高的现象。

虽然组 3 中每个 Mix 项制冷工质流量几乎呈现减小趋势,但通过式(4)计算每个 Mix 项的制冷量,其综合结果是逐渐增加的,COP 则呈现先升高后降低的趋势(如图 19 所示)。可以推测组 3 的 Mix3 中虽然制冷量略低于 Mix4,但 Mix3 中压缩机做功更低,从而使得 Mix3 实验项总体 COP 比 Mix4 偏高。原因分析同 2.1 节。

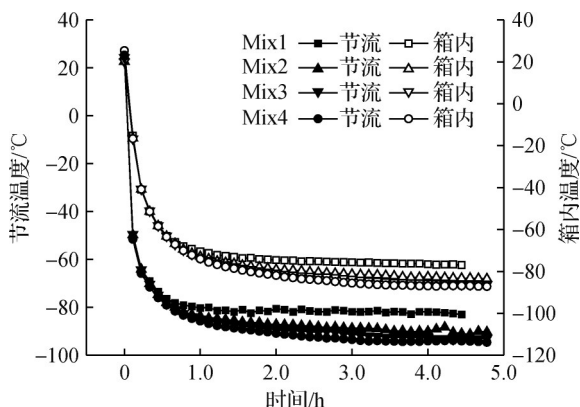


图 15 节流温度及箱内环境温度变化(组 3)

Fig.15 Variation of throttling temperature and ambient temperature in the box (Group 3)

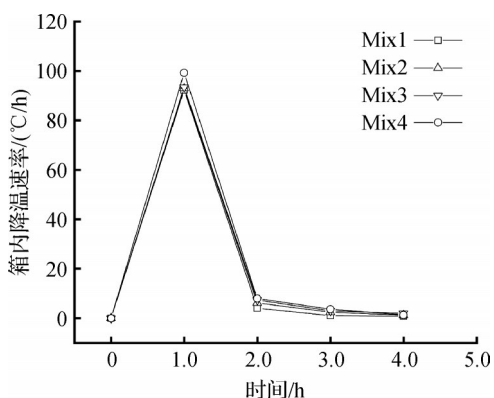


图 16 箱内降温速率变化(组 3)

Fig.16 Variation of cooling rate in box (Group 3)

3 结论

本文通过不同充注质量下的三元混合工质进行实验分析,得到如下结论:

1)林德-汉普逊制冷循环系统中,采用三元混合

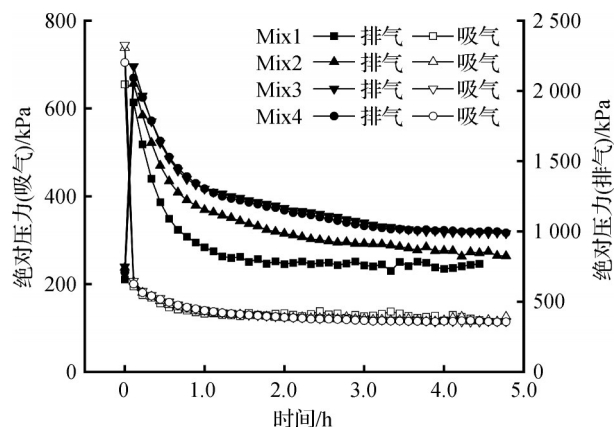


图 17 吸排气压力变化(组 3)

Fig.17 Variation of suction and exhaust pressure (Group 3)

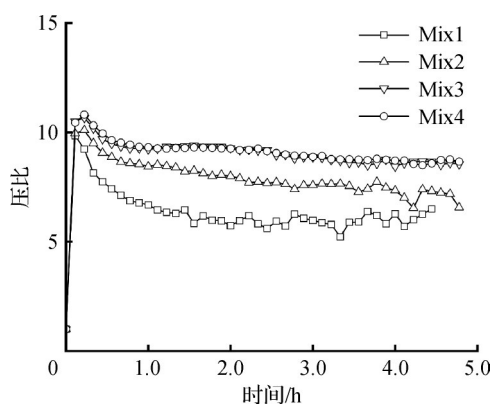


图 18 压比的变化(组 3)

Fig.18 Variation of pressure ratio (Group 3)

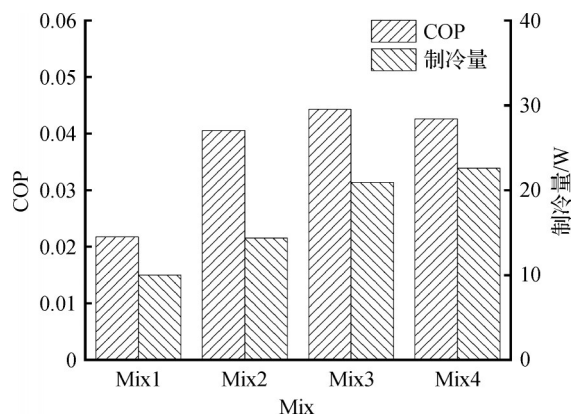


图 19 运行稳定制冷量及 COP(组 3)

Fig.19 Stable operating cooling capacity and COP (Group 3)

工质 R600a/R1150/R50 最佳充注量为 $161.8\text{ g}/26.2\text{ g}/2.0\text{ g}$ 时,运行稳定后得到最佳制冷效果,此时节流温度为 $-94.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,箱内温度可达到 $-87.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,运行稳定时制冷量为 22 W ,COP 为 0.043 。

2)最佳充注量范围内高温工质 R600a 充注量越多,低温工质在回热器中的预冷越充分,节流温度越低;高温制冷工质对于系统的调试可以起到降低排气压力和排气温度的作用。

3) 预冷充分的前提下, 最佳充注量范围内, 添加 R1150 制冷工质, 排气压力、压比和节流温度均可降低; 而添加 R50 制冷工质, 排气压力、压比会升高。

4) 混合工质优化配比后, 各制冷工质之间热当量可以实现接力匹配, 使混合物在系统运行中的最大等温节流效应在全温区内低于单一工质最大等温节流效应。

参考文献

- [1] 黄千卫, 刘妮, 由龙涛. 混合工质林德节流制冷技术的发展分析[J]. 化工进展, 2014, 33(9): 2260-2265. (Huang Qianwei, Liu Ni, You Longtao. Development analysis of the mixed working fluids Linde refrigeration technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(9): 2260-2265.)
- [2] 耿晖, 崔晓钰, 余海龙. J-T效应节流制冷系统的研究进展[J]. 能源研究与信息, 2020, 36(2): 95-102. (Geng Hui, Cui Xiaoyu, She Hailong. Research progress in Joule-Thomson refrigeration system [J]. Energy Research and Information, 2020, 36(2): 95-102.)
- [3] 朱军韬, 张华. 混合工质Linde-Hampson制冷系统的实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(2): 18-23. (Zhu Juntao, Zhang Hua. The experimental research on refrigerant mixtures of a linde-hampson refrigeration system [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(2): 18-23.)
- [4] Yu Mengqi, Liu Ye, Yu Jianlin. Energy and exergy performance evaluation of an ejector enhanced Joule-Thomson cycle with binary mixtures [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 37: 101622.
- [5] 刘嘉瑞, 鱼剑琳, 晏刚. -86 °C超低温医疗冷柜碳氢混合工质替代试验研究[J]. 流体机械, 2025, 53(1): 1-9. (Liu Jiarui, Yu Jianlin, Yan Gang. Experimental evaluation of hydrocarbon mixtures as alternatives in a -86 °C ultra-low temperature medical freezer [J]. Fluid Machinery, 2025, 53(1): 1-9.)
- [6] Liu Jiarui, Yu Jianlin, Yan Gang. Experimental study on Joule-Thomson refrigeration system with R1150/R290/R601a for ultra-low temperature medical freezer [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 255: 124015.
- [7] Liu Jiarui, Liu Ye, Yu Jianlin, et al. Thermodynamic analysis of a novel vapor-injection Joule-Thomson refrigeration cycle with a binary hydrocarbon mixture for -86 °C freezer [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120835.
- [8] Bai Tao, Li Dawei, Xie Hongxu, et al. Experimental research on a Joule-Thomson refrigeration cycle with mixture R170/R290 for -60 °C low-temperature freezer [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 186: 116476.
- [9] Bai Tao, Xie Hongxu, Li Dawei, et al. Experimental investigation on the start-up behaviors of a Joule-Thomson refrigeration system with pressure control [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 215: 118953.
- [10] Park S C, Yoon J I, Son C H, et al. Multi-objective optimization of ultra-low temperature Joule-Thomson cycle using CO₂-based eco-friendly and non-flammable zeotropic mixtures as sustainable refrigerant alternatives [J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 180: 259-273.
- [11] Dasari V, Venkatarathnam G. Effect of heat exchanger and capillary geometry on the performance of Joule-Thomson refrigerators operating with different mixtures [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2024, 16(9): 091008.
- [12] 芮胜军. 自复叠制冷系统机理及控制研究[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021. (Rui Shengjun. Study on mechanism and control of auto-cascade refrigeration system [M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2021.)
- [13] 刘阳, 芮胜军, 刘冬喜, 等. 自复叠制冷系统三元混合工质热物理特性研究[J]. 低温与超导, 2025, 53(6): 98-104. (Liu Yang, Rui Shengjun, Liu Dongxi, et al. Performance analysis of mixed refrigerant of three-stage auto-cascade refrigeration system [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2025, 53(6): 98-104.)
- [14] Zou Lingeng, Bai Tao, Guo Shuo, et al. Binary hydrocarbon mixtures of Joule-Thomson refrigeration cycle based for -70 °C freezer: Theoretical and experimental evaluation [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 64: 105487.
- [15] 公茂琼, 吴剑峰, 罗二仓. 深冷混合工质节流制冷原理及应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2014. (Gong Maoqiong, Wu Jianfeng, Luo Erchang. Principle and application of throttling refrigeration with cryogenic mixture [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2014.)

通信作者简介

赵军, 男, 副教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, 13917779816, E-mail: zhaojun@usst.edu.cn。研究方向: 制冷与低温医学工程高端装备技术, 低温余热利用技术。

About the corresponding author

Zhao Jun, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86-13917779816, E-mail: zhaojun@usst.edu.cn. Research fields: refrigeration and low temperature medical engineering high-end equipment technology, low temperature waste heat utilization technology.

(责任编辑: 王亚薇)