

自复叠制冷系统的组分在线测量方法

李银龙, 景栋梁, 刘国强, 晏刚

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对自复叠制冷系统运行过程中组分浓度难以实时连续测量的问题, 提出了一种混合工质循环浓度在线测量方法, 用于精确测量系统内组分循环浓度、热力学参数及系统能效。在线测量方法基于系统内部件的组分、质量和能量守恒关系, 基于温度、压力、流量数据测量组分循环浓度。搭建自复叠制冷系统实验平台, 在柜内温度 $-58.6\sim-40.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实验工况下验证了在线测量方法的可行性, 并与气相色谱单时静态采样方法对比验证组分在线测量方法的准确性。研究结果表明: 温度是影响组分的关键参数, 实验测试值与在线测量值偏差小于 3 K , 组分循环浓度的在线测量值与气相色谱采样测量值对比最大偏差为 4.45% 。不确定度计算结果显示, 组分循环浓度的在线测量不确定度低于 2.0% , 能效比和制冷量的在线测量不确定度低于 7.5% 。所提在线测量方法能够准确预测自复叠制冷系统的组分循环浓度, 与气相色谱单时静态采样相比, 可获取组分浓度的动态连续变化趋势, 为从组分层面深入分析混合工质热力系统的性能变化提供依据。

关键词: 自复叠制冷系统; 在线测量方法; 混合工质; 循环浓度

中图分类号: TB64 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202504013 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0139-09

Online Measurement Method for Components of Auto-Cascade Refrigeration System

LI Yinlong, JING Dongliang, LIU Guoqiang, YAN Gang

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

Abstract: In response to the challenge of real-time continuous measurement of component concentrations during the operation of auto-cascade refrigeration systems, an online measurement method for the circulating concentration of mixed refrigerant is proposed to accurately measure the circulating component concentrations, thermodynamic parameters, and system efficiency. The online measurement method is based on the composition, mass and energy conservation of components within the system. The circulating concentration of compositions is measured based on temperature, pressure and mass flow rate. An experimental platform for the auto-cascade refrigeration system is established to validate the feasibility of the online measurement method under experimental conditions with cabinet temperatures ranging from $-58.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-40.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. The accuracy of the online measurement of the composition is further verified using gas chromatography single-time static sampling methods. The research findings indicate that temperature, a crucial parameter affecting the composition, shows a deviation of less than 3 K between the experimental

收稿日期: 2024-10-28. 作者简介: 李银龙(1996—), 男, 博士生; 刘国强(通信作者), 男, 助理教授. 基金项目:

国家自然科学基金资助项目(52076160).

网络出版时间: 2024-12-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241230.1723.006>

and online measurement values. The maximum deviation between the online measurement values of the composition concentration and the sampling measurement values is 4.45%. The uncertainty calculations show that the online measurement uncertainty of composition circulating concentration is below 2.0%, while the online measurement uncertainty of energy efficiency ratio and refrigeration capacity is below 7.5%. The proposed online measurement method can accurately predict the circulating concentration of the mixed refrigerant in auto-cascade refrigeration systems. In comparison with gas chromatography single-time static sampling, it allows for dynamic continuous trends in component concentrations, providing a basis for in-depth analysis of performance changes in mixed refrigerant thermodynamic systems at the component level.

Keywords: auto-cascade refrigeration system; online measurement method; mixed refrigerant; circulating concentration

超低温环境广泛用于疫苗与珍贵药品存储等, 据国际制冷所统计, 2020 年底疫苗存储超过 70 亿, 适宜的储存温度范围为 $-90\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。对于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的制冷温区, 采用纯质的蒸汽压缩制冷系统受限于压缩机的应用, 较低的蒸发温度带来了较高排气压力和温度, 系统性能急剧下降^[2]。为此, 复叠循环被提出, 该循环由中间换热器连接高温级和低温级^[3], 由于每级都需配置压缩机, 增加了设备的投资成本和控制策略的复杂性。相比而言, 应用混合工质并采用单台压缩机的自复叠制冷循环 (ARC) 获得了关注^[4], 自复叠系统内不仅能够实现组分的主动调控, 还能在较高的温度下回收润滑油, 具有更高的可靠性^[5]。

目前诸多研究聚焦于循环结构的改进, 文献[6-7] 聚焦于改进分离器的布局, 旨在提升组分的分离效率。Li 等^[8] 引入了涡流管以减少节流过程损失。苑佳佳等^[9] 提出自复叠双压缩循环以降低压缩机功耗。然而, 由于理论分析中缺乏实验系统的研究, 需考虑未经验证的假设, 特别是关键部件压缩机均采用了基于纯制冷剂的的经验公式。混合工质的优化选择同样影响 ARC 系统的能效, 文献[10-13] 中均指出应用混合工质的制冷系统在不同工况下对应的最优组分浓度存在较大差别。制冷剂的选择是系统理论设计阶段中最重要的工作, 理论中的一些假设提供了系统的最优设计, 例如组分的完全分离和固定的组分质量分数, 但这些假设在实验研究中被证明了不合理性, 采用混合工质的系统中常出现组分偏移, 文献[14-16] 对组分偏移现象进行了定量测试, 这使得组分循环浓度预估变得困难, 组分循环浓度的不确定性增加了系统能效评估的复杂性。尽管文献[17-18] 实验中获得了直接测试的热力参数变化, 但是由于组分的不确定性, 系统运行能

效未能评估。文献[19-20] 实验中依靠热平衡法来评估 ARC 系统的能效, 但不能揭示系统能效与组分循环浓度之间的内在关系。

由于组分浓度难以确定, 所以能效评估变得复杂, 这主要源于组分之间复杂的相变行为。在相变过程中, 组分挥发性的差异导致了参数的非线性变化, 所以难以预测和测量不同相中的组分浓度。此外, 温度和压力的波动影响流体的焓、熵和比热容等热力学性质, 这些性质与组分浓度有关, 所以温度、压力参数不能直接预测组分浓度。由于混合制冷剂的实验数据覆盖范围有限, 经验建模和计算模拟存在局限性, 采用复杂的数学模型时, 通常会耗费大量的计算资源, 如何快速测试组分循环浓度是一个亟待解决的问题。

混合制冷剂成分的测量方法一直是研究热点, 在实际应用中, 最成熟的方法是气相色谱法, 实现混合工质的组分分离, 并进行定量检测, 尽管测量结果较为准确, 但该方法离散化且通常比较耗时, 采样测量会泄漏系统内的制冷剂。Wada 等^[21] 提出了一种光吸收方法, 该方法允许非接触式测量, 但非实时检测方法, 其灵敏度通常不高。Fukuta 等^[22] 测量了混合物的折射率以估算浓度, 但需要先进行严格的校准, 无法避免杂质的影响。Baustian 等^[23] 采用了一种高精度的黏度法, 需要大量的实验数据来获得混合物的黏度, 测量效率相对较低。Hwang 等^[24] 提出进行实时测量的低成本电容方法, 这种方法需要介电常数有足够的差异。Lebreton 等^[25] 介绍了一种可进行实时测量并扩展到两相混合物的声速测量方法, 但仪器需要不断校准以确保测量精度。这些方法通过专业设备放大物理信号以检测混合物, 并且需要开发相关数据库或特定混合物实验的

经验关系,测量方法成本高昂。

为实现对 ARC 系统的循环组分浓度、热力学参数及能效的在线实时测量,Llopis 等^[26]开创了实验方法测量研究,首次将一种在线测量方法应用于采用 R600a/R1150 的 ARC 系统,为确保测试结果的稳定性,进行了回热器布局的改进。本文基于 ARC 系统的基本结构流程,提出了一种在线测量方法以实现循环组分浓度的精确测量。搭建单级自复叠制冷系统实验平台,并采用气相色谱组分测试方法,对在线方法的测量准确性进行验证。在线测量方法在减少测试成本的基础上,实时测量了混合工质的循环浓度,获得了能效的实时变化,可为热力系统的优化方向提供依据。

1 实验平台

1.1 自复叠制冷系统实验平台

实验系统采用单级自复叠制冷系统,系统如图 1 所示。实验测试系统内包括主要部件压缩机、冷凝器、蒸发器、分离器、复叠换热器、膨胀阀,制冷系统内的压缩机为往复式压缩机。冷凝器为翅片换热器,长为 400 mm,宽为 240 mm,高为 307 mm,铜管尺寸为 9.52 mm×0.75 mm,蒸发器内置于 215L 的保温箱体内,箱体采用 80 mm 高密度膨胀聚氨酯隔热,实验各部件间的连接管路采用宽为 40 mm 的保温棉隔热。复叠换热器为并焊换热器,管长为 15 m,热侧管径为 6 mm,冷侧管径为 9.52 mm,换热器外侧增加 100 mm 的聚氨酯保温层,分离器采用旋流式分离器,用于分离气液两相制冷剂。实验采用碳氢类混合工质 R600a/R170,该工质具有良好的环保性,符合目前制冷剂的替代趋势,工热热物性参数如表 1 所示。

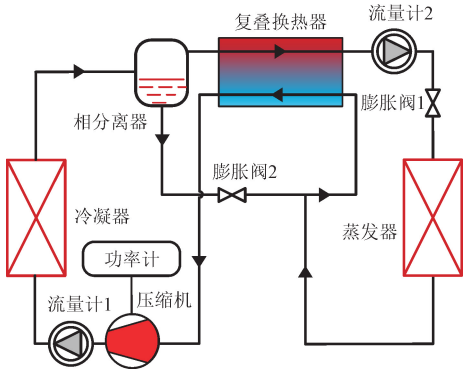


图 1 自复叠制冷系统实验平台

Fig. 1 Auto-cascade refrigeration system experimental platform

表 1 混合工质的热物性参数

Table 1 Thermal properties of refrigerants

混合工质	摩尔质量/ (g·mol ⁻¹)	标准沸点/℃	临界温度/℃	临界压力/MPa
R600a	58.122	−11.75	134.66	3.629
R170	30.069	−88.58	32.17	4.872

自复叠系统的循环流程如下:首先,压缩机出口的高温高压气体进入冷凝器,经冷凝器部分冷凝的制冷剂进入分离器,总流组分的制冷剂分离为富含高沸点组分的液相流和富含低沸点组分的气相流,分离器进口的视液镜内可观察呈两相状态,气相流进入复叠换热器热侧,被完全冷凝;之后,进入电子膨胀阀 1,降温降压后进入蒸发器,蒸发器进口达到系统内制冷剂的最低温度,制冷剂吸收保温箱内热量以两相状态流出蒸发器,分离器液相出口制冷剂经过电子膨胀阀 2,与蒸发器出口制冷剂混合;最后,混合流进入复叠换热器冷侧,混合流提供了热侧冷凝所需要的冷量,吸热达到过热状态后进入压缩机吸气口,被压缩至高温高压气体,完成循环过程。

表 2 为实验设备的测量范围及精度,记录了压缩机、冷凝器、复叠换热器和蒸发器进出口的温度和压力,记录了分离器液相出口和节流后温度。系统内包括 6 个压力传感器,分别为压缩机吸气压力 p_1 、排气压力 p_2 、冷凝器出口压力 p_3 、复叠换热器热侧出口压力 p_4 、蒸发器进口压力 p_5 和出口压力 p_6 ,测试了每个部件的压降,避免管路压降造成的参数偏差。另外,包括 14 个温度传感器,11 个温度传感器布置于管路上,测试了压缩机吸气和排气温度 t_1 、 t_2 ,冷凝器出口温度 t_3 ,复叠换热器热侧进口和出口温度 t_4 、 t_5 ,冷侧进口和出口温度 t_6 、 t_7 ,蒸发器进口和出口温度 t_8 、 t_9 ,相分离器液相出口温度 t_{10} 和膨胀阀 2 出口温度 t_{11} ,3 个温度传感器设置于保温箱内,分别为 t_{12} 、 t_{13} 、 t_{14} 。按照国家标准 GB/T 20154—2014^[27] 低温保存箱内在 1/6H、1/3H 和 5/6H 高度处分别布置,水平方向为 1/2 L。其中 H、L 代表柜体的高和宽。箱内温度为 3 个温度测试的平均值,压缩机出口和复叠换热器热侧出口安装了质量流量计,分别测试了 m_t 、 m_v 。压缩机功率的测试采用功率计,测试了压缩机功耗 W。实验平台内温度测量采用 T 型热电偶,精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。压力传感器的测量精度为满量程的 $\pm 0.1\%$,低压压力为 0~1 000 kPa,高压压力为 0~4 000 kPa,功率计量程为 0~4 000 W,精度为 $\pm 0.25\%$ 。

表 2 实验设备的测量范围及精度

Table 2 Measurement range and accuracy of experimental equipment

测量参数	测量范围	测量精度
P_2, P_3, P_4	0~4 MPa	$\pm 0.1\%$
P_1, P_5, P_6	0~1 MPa	$\pm 0.1\%$
$t_1 \sim t_{14}$	-200~350 °C	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
m_i	0~30 kg/h	$\pm 0.5\%$
m_v	0~15 kg/h	$\pm 0.5\%$
W	0~4 kW	$\pm 0.25\%$

1.2 气相色谱分析方法

混合工质组分浓度测量的常用方法是气相色谱法,在系统运行过程中,从纯气相管路中进行组分采样,之后进行仪器检测。测试流程如下:对采样容器抽真空,利用控制阀和微量调节阀调节进行微量样品采集;调整气相色谱仪的氢气、空气和氮气的进气流量;设定 FID 的工质检测方法;设置检测器测试温度;进行基线校正、峰识别、计算峰面积等数据采集与处理;进行样品信息分析,输出测试结果。

气相色谱法的检测方法强烈依赖专家经验,需在系统运行过程中采样,样品量需要达到仪器的测试标准,会造成系统内制冷剂充注量减少。自复叠制冷系统无论是对制冷剂的充注量还是充注配比都较为敏感,当前大部分系统采用可燃制冷剂,按照目前制冷剂的替代进展,欧洲强制采用纯天然制冷剂,特别是碳氢类制冷剂,采样方法带来了制冷剂可燃的风险。

1.3 测量不确定度

由于测量仪器精度的限制、操作技术差异等因素,实验结果存在不确定性。不确定度分析可以定量评价随机误差和系统误差,保证实验结果的可靠性,使用测量不确定度来评估不确定度^[28]。

对于直接测量的参数 x ,假设概率均匀分布,标准不确定度为

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (1)$$

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

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

式中: $u_A(x)$ 为 A 类不确定度,通过对重复观测值进行统计分析,得到观测值标准差的统计估计; $u_B(x)$ 为 B 类不确定度,由假设概率分布的标准差计算; $\bar{x}$ 为变量 x 的平均值; n 为测量次数; a 为分布半宽。

计算结果表明,0~4 MPa 压力传感器的不确定度为 $\pm 2.4\text{ kPa}$,0~1 MPa 压力传感器的不确定度

为 $\pm 0.58\text{ kPa}$,温度传感器的不确定度为 $\pm 0.29\text{ }^{\circ}\text{C}$,0~15 kg/h 质量流量计的不确定度为 $\pm 0.044\text{ kg/h}$,0~30 kg/h 质量流量计的不确定度为 $\pm 0.088\text{ kg/h}$,功率计的不确定度为 $\pm 5.77\text{ W}$,气相色谱法的不确定度为 0.29% 。

2 在线测量方法

实验仪器的测量仅能获得压力、温度、流量及耗功等基础数据,对于最关键的组分浓度测试还无法完成,因此在线测量方法被提出,以实现组分的连续精确测量。在线测量方法满足以下条件:混合工质的组分守恒与系统内质量、能量守恒相关,依据系统内组分守恒、质量守恒以及能量守恒的关系,可通过建立数学模型获得不同支路的制冷剂组分;质量流量计的测试位置需保证测试的稳定性,流量计只能测试纯气相状态和纯液相状态,特别是液相测试,只有稳定的液相且有一定的过冷度,才能够保证测试的稳定性和准确性,纯液相状态只有复叠换热器的热侧出口;为避免润滑油对制冷剂组循环浓度的影响,实验系统内压缩机排气口设置了高效的油分离器;REFPROP V. 10 数据库提供了混合工质的热力学参数计算,依据实验测试参数即可确定热力学参数。

根据基本的理论模型,制冷剂状态点热力参数计算式为

$$(p, t, h, q, \dots) = f(x_1, x_2, w, \dots) \quad (4)$$

式中: p, t, h, q 分别为压力、温度、焓值、干度; x_1, x_2 为已知参数; w 为制冷剂组分质量分数。

气液分离器有质量、能量和组分守恒关系,无论气相和液相出口是否存在气液夹带的情况,守恒关系计算式如下

$$m_t = m_i + m_v \quad (5)$$

$$m_i h_i = m_i h_1 + m_v h_v \quad (6)$$

$$m_t z_t|_1 = m_i z_i|_1 + m_v z_v|_1 \quad (7)$$

式中: m_i, m_v, m_t 为总流、气相流和液相流的组分制冷剂流量, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$; h_i, h_v, h_1 为气液分离器进口和出口总流、气相流和液相流的制冷剂焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; z_t, z_v, z_1 为气液分离器进口和出口总流、气相流和液相流的制冷剂组分配比。

复叠换热器两侧的换热关系式如下

$$Q_v = m_v (h_{\text{chx-hi}} - h_{\text{chx-ho}}) \quad (8)$$

$$Q_t = m_t (h_{\text{chx-ci}} - h_{\text{chx-co}}) \quad (9)$$

式中: Q_v, Q_t 分别为热侧、冷侧的换热量, W ; $h_{\text{chx-hi}}, h_{\text{chx-ho}}$ 分别为热侧进口和热侧出口的焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $h_{\text{chx-ci}}, h_{\text{chx-co}}$ 分别为冷侧进口和冷侧出口的制冷剂焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

制冷量计算式为

$$Q_e = m_v (h_{\text{eva-o}} - h_{\text{eva-i}}) \quad (10)$$

式中： Q_e 为系统制冷量， W ； $h_{\text{eva-o}}$ 、 $h_{\text{eva-i}}$ 为蒸发器进口和出口的制冷剂焓值， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

自复叠制冷系统的能效比为

$$\epsilon = \frac{Q_e}{W_a}$$

(11)

式中： W_a 为压缩机的实际耗功， W 。

在线测试方法避免了制冷剂的泄漏，同时减少了检测的成本和时间。基于系统内的质量、能量和组分守恒关系，用气相流量计测试压缩机排气的总流量，用液相流量计测试纯液相流量，假设未知的总流组分配比和气相流组分配比，假设的制冷剂组分需满足气液分离器的组分、质量、能量守恒方法，同时需满足复叠换热器的能量守恒。复叠换热器的热侧为气相流组分的冷凝换热过程，冷侧为总流组分的蒸发换热过程，当总流组分和气相流、液相流组分确定后，即可对蒸发器的制冷量进行计算。结合压缩机的功率测试数据，即可对系统能效进行评估，在线测量方法的计算流程如图 2 所示，图中方括号为测量值，虚线方括号为输出值。

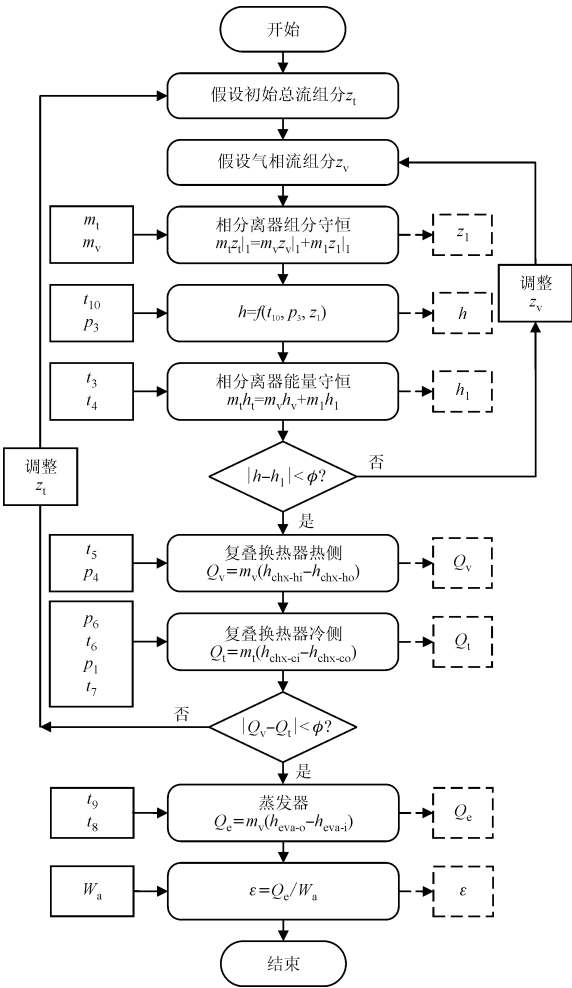


图 2 在线测量方法计算流程

Fig. 2 The calculation logic of online measurement method

在线测量方法以实验测试展开，系统充注了 360 g 的 R600、R170，并在 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的环境中运行。柜内温度和压缩机的吸、排气压力变化如图 3 所示，实验初始为空载过程，最终温度为 -58.9°C 。当温度在 $\pm 0.5\text{ K}$ 范围内持续约 1 h，认为处于稳定状态，之后通过调节电加热输入功率来改变箱内温度，最终选定的机柜温度为 -58.6 、 -55.2 、 -51.5 、 -46.2 、 -40.4°C 。在压缩机启动阶段，制冷剂被迅速压缩到高压侧，使排气压力达到 1 800 kPa，吸气压力迅速下降，随着制冷剂冷凝，通过电子膨胀阀的制冷剂质量流量逐渐增加，导致吸气和排气压力升高。随着柜内温度逐渐降低，吸、排气压力下降，直到相对稳定的状态。图 4 为选择的温度点对应的压缩机吸排气压力和蒸发器进、出口的压力。

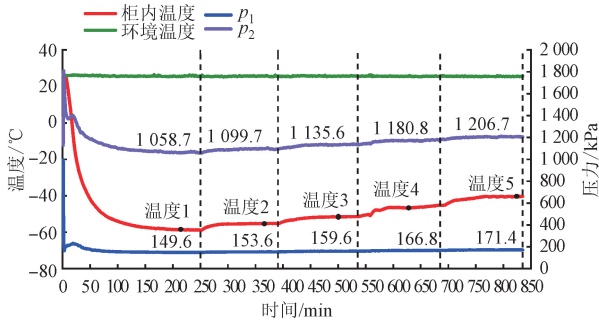


图 3 柜内温度和压缩机吸、排气压力的变化

Fig. 3 Temperature inside the cabinet, suction pressure and discharge pressure of the compressor variations

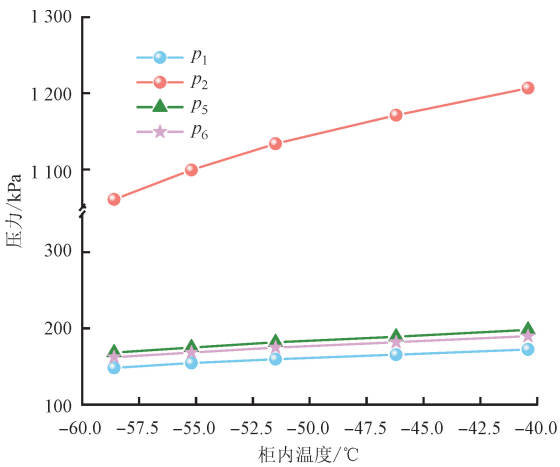


图 4 柜内温度特征点的压力变化

Fig. 4 Pressure variations of internal temperature points

压缩机吸气压力由 149.6 kPa 升高至 171.4 kPa，压缩机的排气压力变化比较明显， -58.6°C 的排气压

力为 1 058.7 kPa, -40.4°C 的排气压力为 1 206.7 kPa。蒸发器进出口的压力随着箱内温度的上升而上升, 并且蒸发器的压降增加, 实验测试结果表明, 理论计算中未考虑蒸发器内制冷剂流动压降是不合理的, 蒸发器内的压降影响制冷量的计算。由于复叠换热器冷侧的压降, 蒸发器出口至压缩机的吸气口之间存在较大的压降, 因此实验测试系统布置了较多的压力测点, 确保准确计算复叠换热器冷侧的负荷。

在线测量方法的验证通过如下两个方面: 估算未知状态点的热力参数, 并与实验测试参数对比验证; 在线测量方法计算所得总流组分质量分数与采样方法测试的压缩机排气组分质量分数对比。

图 5 为在线测量方法计算所得状态点温度, 包括 t_6 、 t_8 、 t_{10} 、 t_{11} , 可知在线测量方法对系统内的状态点估计具有较高的精度, 温度的偏差均小于 3 K。 t_8 、 t_{11} 预估有所差异是因为这两个点处于两相状态, 具有较大的不确定度。因此, 所提在线方法具有较高的准确性, 可用于评估自复叠制冷系统。

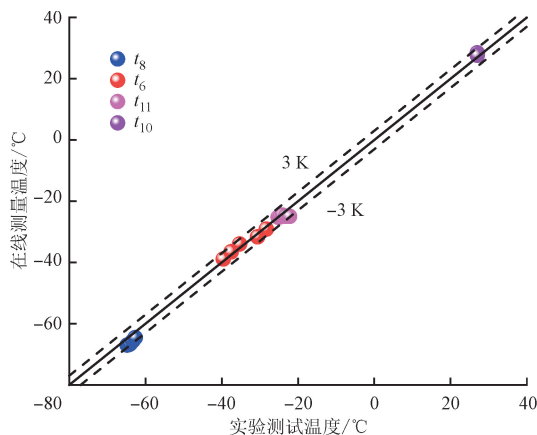


图 5 实验测试温度与在线测量温度对比

Fig. 5 Comparison between test temperature and calculated temperature

图 6 展示了在线测量方法计算得到的总组分和气相色谱法采样测试的对比结果, 可知在线测量方法与采样方法之间存在较小误差。柜内温度为 -40.4°C 时, 在线测量方法与采样测量方法之间的相对误差为 4.45%。在 -58.6°C 、 -46.2°C 时, 误差分别为 1.75%、1.23%。在 -55.2°C 、 -51.5°C 时, 误差均小于 1.0%, 所以必须考虑采样方法的不确定性, 在线测量方法对组分浓度的准确性具有较好的预估效果。

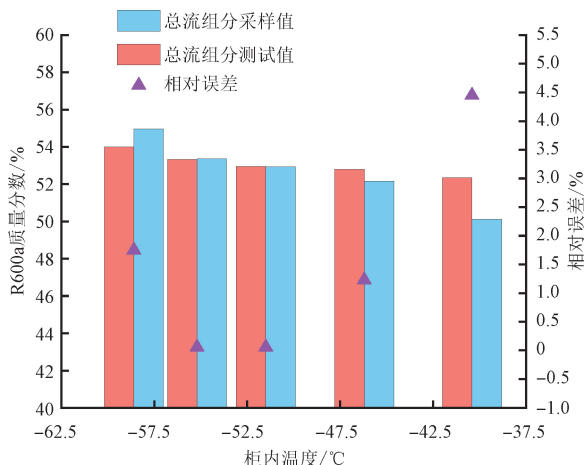


图 6 在线测量方法与采样方法的组分质量分数测试对比

Fig. 6 The composition comparison between online measurement method and sampling method

组分与能效比不确定度的计算方法引用文献[26]的方法, 即参数的不确定度由每个参数偏差的几何算术平均值确定, 计算式如下

$$I_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n I_j^2} \quad (12)$$

$$I_j = \frac{|X_{j+} - X_0| + |X_{j-} - X_0|}{2} \quad (13)$$

式中: j 为传感器参数; n 为传感器参数数量; X_0 为测量值得到的计算值; X_{j+} 为测量值加上仪器不确定度得到的计算值; X_{j-} 为测量值减去仪器不确定度得到的计算值。以组分计算为例, 计算式如下

$$I_t = \frac{|z_{t+} - z_0| + |z_{t-} - z_0|}{2} = \frac{|f(t + \epsilon_t, p, \rho) - z_0| + |f(t - \epsilon_t, p, \rho) - z_0|}{2} \quad (14)$$

式中: I_t 为温度测试引起的不确定度; z_0 为温度测试值计算得到的组分; z_{t+} 为温度测量值加上其测量误差 ϵ_t 计算得到的组分; z_{t-} 为温度测量值减去其测量误差 ϵ_t 计算得到的组分。相同的不确定度测量也可以应用到由压力和流量, 利用在线测量方法中对总流组分和气相流或液相流组分共用到了 12 个传感器, Q_c 的测量增加了 3 个传感器, ϵ 在此基础上增加了功率测量的不确定度。

图 7 为在线测量方法计算得到的 ϵ 、 Q_c 以及总流、气相流中 R600a、R170 质量分数的不确定度。对于 Q_c 、 ϵ , 在 -58.6°C 存在最大的不确定度, ϵ 的不确定度为 7.12%, Q_c 的不确定度为 6.95%。在 -40.4°C 时, ϵ 、 Q_c 有最小的不确定度, 分别为 3.46%、

3.14%。对于总流、气相流中组分的测量,由于测试参数一致,计算得到的不确定度比较接近,均在 2% 以下。

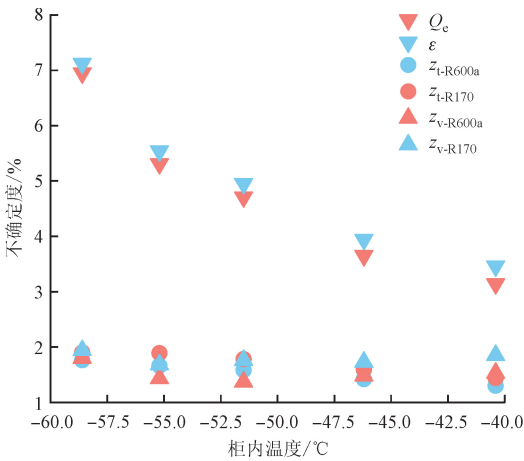


图 7 不同柜内温度对应的不确定度

Fig. 7 The uncertainty calculation for different cabinet temperature

图 8 为在线测量方法计算得到的不同柜内温度对应的总流组分、气相流组分和液相流组分。R600a/R170 的充注比例为 65%、35%，总流循环中高沸点组分 R600a 偏移到了 55% 以下，低沸点组分 R170 偏移到了 45% 以上，组分之间的偏移使得实验级别的系统能效无法达到理论循环的能效，基于组分的偏移规律才能指导组分的初始充注。在较低的柜内温度下，高沸点组分 R600a 参与循环的比例增加，而低沸点组分 R170 则相反，由此带来了排气压力和排气温度的降低。

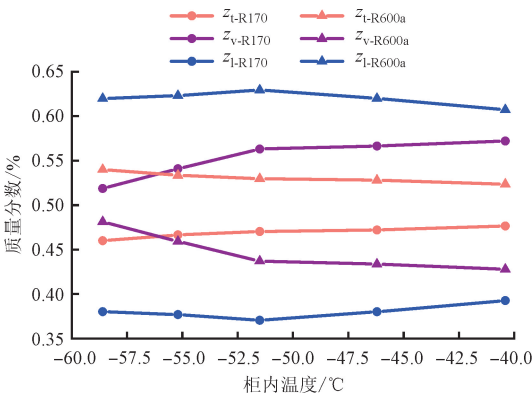


图 8 组分质量分数随柜内温度的变化

Fig. 8 The mass fraction variation of compositions with cabinet temperature

随着柜内温度的上升,总流中低沸点 R170 逐渐增加,排气压力随之上升。相应地,进入蒸发器的

R170 质量分数超过了 R600a,液相流中 R600a 的质量分数超过了 60%，尽管气液分离效率不高,但是起到了组分分离的效果。较低温度下蒸发器内的 R170 质量分数在降低,意味着蒸发温度降低的潜力在下降,在本实验的研究中,进一步降低箱内温度变得困难。分离效率降低造成液相流中混合了部分气相制冷剂,在整个温度变化范围内,液相流中制冷剂的质量分数变化较小,与文献[26]研究结果一致。

3 结 论

针对 ARC 系统运行过程中组分浓度难以实时连续测量的问题,本文提出了一种混合工质在线测量方法,实验验证了在线测量方法的可行性,并计算了方法的不确定度,得到如下主要结论。

(1)在线测量方法实现了组分浓度的实时测量,避免了采样测量方法造成的系统内制冷剂充注量变化。基于混合工质的系统内组分、质量、能量守恒准则,在线测量了系统内组分的循环浓度,并实现了系统能效的在线评估。

(2)以应用 R600a/R170 的 ARC 系统,实验验证了在线测量方法的可行性,保温箱体内部温度从 -40.4 °C 到 -58.6 °C,采用 6 个压力传感器和 11 个温度传感器全方面测试了部件的热力参数。

(3)实验验证了在线测量方法的准确性,温度是影响组分测量的关键参数,实验测试与在线测量之间的偏差小于 3 K。气相色谱采样的组分测量方法与在线测量方法之间的最大偏差小于 4.5%，组分在线测量的不确定度小于 2.0%，制冷量和能效比的不确定度小于 7.5%。

混合工质循环浓度是采用混合工质能效评估的重要依据,在线测量方法能够实时、高效地测量混合工质的循环浓度,避免了采样方法造成的工质泄漏对系统的影响,为应用混合工质的热力系统提供了理论依据。

参考文献:

[1] United Nations Environment Programme International Institute of Refrigeration. Cold chain technology brief: vaccines [EB/OL]. [2024-09-09]. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/36732>.
[2] YANG Sheng, DENG Chengwei, LIU Zhiqiang. Optimal design and analysis of a cascade LiBr/H₂O absorption refrigeration/transcritical CO₂ process for low-grade waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 192: 232-242.

- [3] 乔亦圆, 杨东方, 曹锋, 等. R134a/R23 复叠制冷系统级间容量比的优化分析 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 104-110.
QIAO Yiyuan, YANG Dongfang, CAO Feng, et al. Optimization of compressors displacement ratio in R134a/R23 cascade refrigeration system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 104-110.
- [4] 李银龙, 刘国强, 刘嘉瑞, 等. 自复叠制冷系统及其组分分离、迁移与调控研究进展 [J]. 制冷学报, 2024, 45(1): 1-17.
LI Yinlong, LIU Guoqiang, LIU Jiarui, et al. Review of research progress on auto-cascade refrigeration systems and component separation, migration, and regulation [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(1): 1-17.
- [5] 刘鹏鹏, 盛伟, 焦中彦, 等. 自复叠制冷技术发展现状 [J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 45-51.
LIU Pengpeng, SHENG Wei, JIAO Zhongyan, et al. Development status of auto-cascade refrigeration technology [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(4): 45-51.
- [6] SOBIERAJ M, ROSINSKI M. High phase-separation efficiency auto-cascade system working with a blend of carbon dioxide for low-temperature isothermal refrigeration [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 161: 114-149.
- [7] LIU Jiarui, LIU Ye, YAN Gang, et al. Thermodynamic analysis on a modified auto-cascade refrigeration cycle with a self-recuperator [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 137: 117-128.
- [8] LI Yinlong, YAN Gang, YANG Yuqing, et al. Thermodynamic analysis of new configurations of auto-cascade refrigeration cycles integrating the vortex tube [J]. Energy, 2024, 308: 132982.
- [9] 苑佳佳, 王林, 谈莹莹, 等. 自复叠双压缩制冷循环特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2022, 43(11): 2886-2892.
YUAN Jiajia, WANG Lin, TAN Yingying, et al. Study on an auto-cascade parallel-compression refrigeration cycle [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(11): 2886-2892.
- [10] YAN Gang, HU Hui, YU Jianlin. Performance evaluation on an internal auto-cascade refrigeration cycle with mixture refrigerant R290/R600a [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 994-1000.
- [11] SIVAKUMAR M, SOMASUNDARAM P. Exergy and energy analysis of three stage auto refrigerating cascade system using zeotropic mixture for sustainable development [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 84: 589-596.
- [12] RODRÍGUEZ-JARA E Á, SÁNCHEZ-DE-LA-FLOR F J, EXPÓSITO-CARRILLO J A, et al. Thermodynamic analysis of auto-cascade refrigeration cycles, with and without ejector, for ultra low temperature freezing using a mixture of refrigerants R600a and R1150 [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117598.
- [13] 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 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(11): 37-42.
WANG Qin, CHEN Fusheng, XIA Peng, et al. Influence of mixture composition on cooling rate of a freeze-dryer with an auto-cascade refrigerating system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(11): 37-42.
- [14] GONG Maoqiong, DENG Zhaobin, WU Jianfeng. Composition shift of a mixed-gas Joule-Thomson refrigerator driven by an oil-free compressor [J]. Cryocoolers, 2007, 14: 453-458.
- [15] SREENIVAS B, NAYAK H G, VENKATARATHNAM G. Relationship between composition of mixture charged and that in circulation in an auto refrigerant cascade and a J-T refrigerator operating in liquid refrigerant supply mode [J]. Cryogenics, 2017, 81: 42-46.
- [16] 潘彦池, 刘金平, 许雄文, 等. 自复叠制冷系统降温过程组分浓度优化及控制策略 [J]. 化工学报, 2017, 68(8): 3152-3160.
PAN Yaochi, LIU Jinping, XU Xiongwen, et al. Component concentration optimization analysis of cooling process and control strategy in auto-cascade refrigeration system [J]. CIESC Journal, 2017, 68(8): 3152-3160.
- [17] RUI Shengjun, ZHANG Hua, ZHANG Bohan, et al. Experimental investigation of the performance of a single-stage auto-cascade refrigerator [J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(1): 11-20.
- [18] APREA C, MAIORINO A. Autocascade refrigeration system: experimental results in achieving ultra low temperature [J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(6): 565-575.
- [19] DU Kai, ZHANG Shaoqian, XU Weirong, et al. A study on the cycle characteristics of an auto-cascade refrigeration system [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(2): 240-245.
- [20] BAI Tao, YAN Gang, YU Jianlin. Experimental investigation of an ejector-enhanced auto-cascade refrigeration system [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 84: 589-596.

- ration system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 792-801.
- [21] WADA A, NOMURA M, TSUBOI K, et al. A novel approach to instrumentation and application for OCR measurement in refrigeration system [C]//*International Compressor Engineering Conference*. [S. l.]: [s. n.], 1992: 840.
- [22] FUKUTA M, YANAGISAWA T, SHIMASAKI M, et al. Real-time measurement of mixing ratio of refrigerant/refrigeration oil mixture [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(7): 1058-1065.
- [23] BAUSTIANJ J, PATE M B, BERGLES A E. Measuring the concentration of a flowing oil-refrigerant mixture with a bypass viscometer [J]. *ASHRAE Transactions*, 1988, 94: 588-601.
- [24] HWANG Y, RADERMACHER R, HIRATA T. Oil mass fraction measurement of CO₂/PAG mixture [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(2): 256-261.
- [25] LEBRETON J, VUILLAME L. Oil concentration measurement in saturated liquid refrigerant flowing inside a refrigeration machine [J]. *International Journal of Applied Thermodynamics*, 2001, 4(1): 53-60.
- [26] LLOPIS R, MARTÍNEZ-ÁNGELES M, GARCÍA-VALERO M. A novel method to measure the energy efficiency and performance of an auto-cascade refrigeration cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121146.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 低温保存箱: GB/T 20154-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [28] KUANG Y C, RAJAN A, OOI M P L, et al. Standard uncertainty evaluation of multivariate polynomial [J]. *Measurement*, 2014, 58: 483-494.

(编辑 赵炜)