

文章编号:0253-4339(2013)02-0070-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.02.070

一种新型多级冷凝过滤分离装置的设计及研究

王莹¹ 张吉恒¹ 孙颖¹ 吴邦喜² 王起霄¹ 赵全华²

(1 哈尔滨商业大学能源与建筑工程学院 哈尔滨 150028; 2 国内贸易工程设计研究院 北京 100069)

摘 要 自动复叠制冷循环系统结构简单、运行可靠。该循环使用非共沸混合制冷剂,其冷凝分离是否完全直接影响着循环制冷效率的高低。针对这一问题,设计一种新型多级冷凝过滤分离装置,并采用配有该装置的自动复叠制冷循环系统进行实验研究,结果表明该装置不仅实现了非共沸混合工质高、低沸点组分的高效分离,提高了系统的制冷效率和稳定性,而且结构简单、成本较低,具有极强的生产实用性。

关键词 自动复叠制冷循环;非共沸混合制冷剂;多级冷凝过滤分离装置;高效分离

中图分类号:TB657.7; TB661 文献标识码:A

The Design and Research a New Kind Multistage Condensation Filtration Disengaging Gear

Wang Ying¹ Zhang Jiheng¹ Sun Ying¹ Wu Bangxi² Wang Qixiao¹ Zhao Quanhua²

(1. College of Energy and Civil Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, 150028, China; 2. Internal Trade Engineering Design and Research Institute, Beijing, 100069, China)

Abstract The structure of automatic cascade refrigeration system is simple, and the operation is reliable. Since the non-azeotropic mixed refrigerants are used, whether the condensing separation is complete or not will directly affect the cooling efficiency. A new type of multistage condensing filtration disengaging gear is proposed in the paper. A test-bed of automatic cascade refrigeration system equipping with the device is set up for actual application research. The results show that the device can separate high and low boiling point group efficiently. Because of its simple structure and low cost, the device may have important potential of practical application.

Keywords automatic cascade refrigeration system; non-azeotropic mixtures; multistage condensation filtration disengaging gear; efficient separation

近年来,自动复叠制冷循环系统以其结构简单、性能可靠,仅采用单级压缩就能实现较低的制冷温度而引起业内的关注,广泛应用于半导体制冷工业、药品的低温保存、食品的冷冻储存等低温领域。

自动复叠制冷循环使用非共沸混合制冷剂,混合工质分离效率的高低直接影响着循环的制冷效率。较低的分离效率使压缩机的制冷量减少,整个系统的运行效率降低,运行时间延长造成能源的浪费,给用户造成巨大损失^[1-2]。为了使混合工质获得较高的分离效率,这里首次提出了一种多级冷凝过滤分离装置,对自动复叠循环制冷系统进行改进,实现高、低沸点组分的高效分离;同时润滑油也在组分分离的过程中随高沸点组分制冷剂返回到压缩机,不会进入低温系统造成盘管堵塞。为检验该冷凝过滤分离装置的分离效果,采用 R22 和 R23 为混合工质,通过一套自动复叠循环制冷系统,对该装置的实际应用性能进行

了全面的实验研究。

1 传统冷凝分离装置

混合制冷工质是由两种或两种以上的纯制冷工质以一定比例混合而成。按照混合后的溶液是否具有共沸的性质,混合制冷工质可分为共沸和非共沸制冷工质。

非共沸混合制冷工质是指混合工质没有共沸点,在定压下蒸发或凝结时,温度不断变化,气相和液相的成分也在不断变化。在自动复叠制冷循环中,非共沸混合制冷工质经单级压缩机压缩后排入冷凝器进行冷凝,其中高沸点制冷工质首先被冷却变成液体,低沸点制冷工质还保持气体状态,此时需要一个分离设备对两种不同状态的混合制冷工质进行分离。

经过分离的高沸点制冷工质节流后,在冷凝蒸发器内继续冷凝低沸点制冷工质,并使低沸点制冷工质

变成液体状态,能否很好的把低沸点制冷工质冷却成液体,关键在于两种非共沸制冷工质的分离是否完全。

传统的自动复叠制冷循环系统常使用重力沉降分离、折流分离、离心力分离、丝网分离、填料分离等方法来分离非共沸制冷工质^[5],其中以重力沉降分离、填料分离的应用较为普遍。

贮液式汽液分离器就是采用重力沉降原理来分离非共沸混合制冷工质,其结构如图 1 所示^[3]。非共沸制冷工质的汽液混合物从 1 进入贮液器,通过减速、改变流向,使得两种工质自动分离,气体、液体分别从 3 气体、4 液体出管流出。这种汽液分离器的效率一般很低,约为 60%~70%,即便采用多级分离也仅能达到 70%~85%,难以满足复叠制冷系统所要求的分离纯度。

常用的填料分离式汽液分离器为精馏塔,其结构如图 2 所示^[4]。

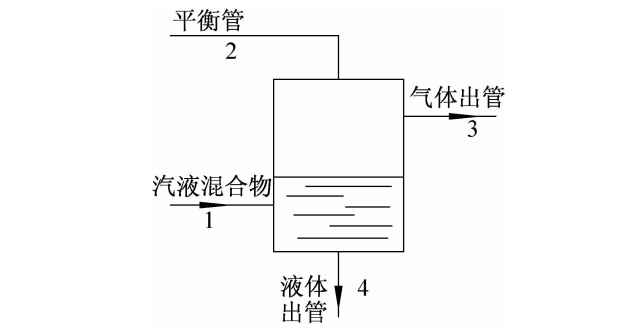


图 1 贮液式汽液分离器示意图
Fig. 1 The schematic drawing of gas-liquid separator with storage fluid type

2 新型多级冷凝过滤分离装置设计

这里首次提出了一种多级冷凝过滤分离装置,结构如图 3 所示。

非共沸混合工质由贮液式分离器 1 的顶部进入,并伸入到贮液式分离器 1 的液体里,高沸点制冷工质液体和润滑油聚集在贮液式分离器 1 的底部,大量低沸点制冷工质和少部分高沸点制冷工质经过伞型罩和丝网除沫器过滤分离后由贮液式分离器 1 的上部引出,进入一级冷凝过滤分离器 2 内进行冷凝分离(B,D 阀开启,C 阀关闭)。在一级冷凝过滤分离器中,大部分高沸点和极少部分低沸点制冷剂气体被冷凝盘管冷凝变成液体,通过观察液位的高低来控制 E 阀的开关,使冷凝后的高沸点液体状态的制冷工质回到贮液式分离器 1 中;大部分低沸点和极少部分高沸点制冷工质气体由 D 阀排出。为使非共沸制冷工质的分离效率更高,该冷凝过滤分离装置还设置了二级

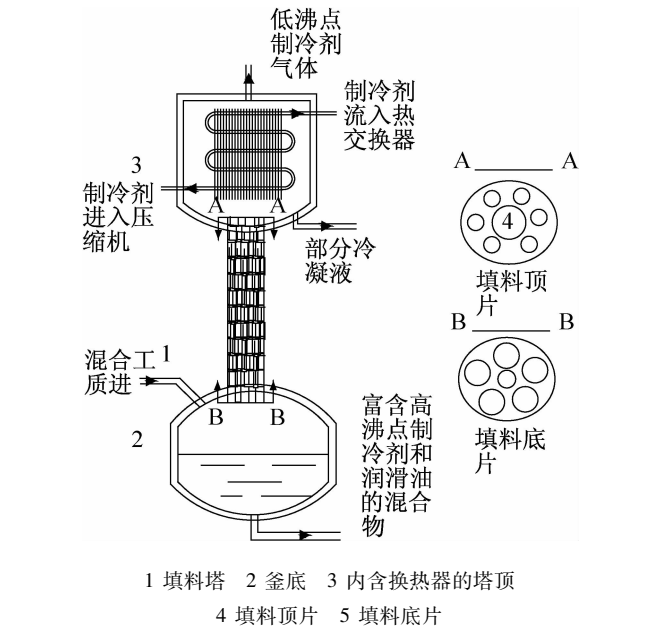


图 2 精馏塔结构示意图
Fig. 2 The schematic drawing of rectifying column structure

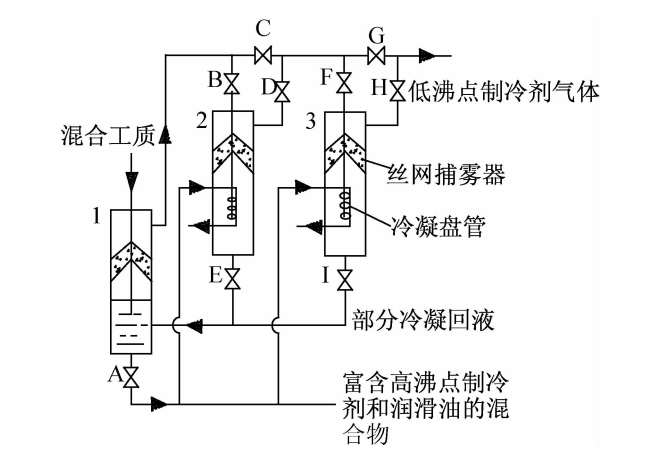


图 3 两级冷凝过滤分离装置示意图
Fig. 3 The rectifying column of two stage condensation filtration disengaging gear

冷凝过滤分离器 3,其分离过程与前者相同。

2.1 多级冷凝过滤分离器壳体的设计

设计采用立式汽液分离器,分离器的轴向尺寸对气液分离效果影响不大,因此壳体设计的主要任务是确定分离器的壳体直径。参考氨用汽液分离器的壳体直径计算公式^[5],氟利昂用汽液分离器的壳体直径按下式计算:

$$D = \sqrt{\frac{4Gv}{3600\pi w}} \quad (1)$$

式中: D 为壳体直径,m; G 为制冷剂流量,kg/s; v 为制冷剂比容,m³/kg; w 为汽液分离器中气流通过横截面的速度,m/s。

$$G_{R23} = \frac{Q_0}{q'_0} \quad (2)$$

式中: G_{R23} 为 R23 的质量流量, kg/s; Q_0 为冷柜耗冷量, kW; q'_0 为 R23 单位质量制冷量, kJ/kg, $q_0 = h_5 - h_{5'} = h_5 - h_4$ 。

在计算出 R23 的质量流量后, 通过对冷凝蒸发器换热量的估算, 来确定 R22 的质量流量。

$$Q_{k, R23} = G_{R23} \cdot (q'_0 + w'_0) \quad (3)$$

式中: $Q_{k, R23}$ 为 R23 的冷凝负荷, kW; G_{R23} 为 R23 的质量流量, kg/s; w'_0 为 R23 单位理论功, kJ/kg。

$$Q_{0, R22} = 1.2 \times Q_{k, R23} \quad (4)$$

式中: $Q_{0, R22}$ 为 R22 的蒸发负荷, kW; 1.2 为安全系数。

$$G_{R22} = \frac{Q_{0, R22}}{q_0} \quad (5)$$

式中: G_{R22} 为 R22 的质量流量, kg/s; q_0 为 R22 单位质量制冷量, kJ/kg, $q'_0 = h_{11} - h_{10} = h_{11} - h_9$

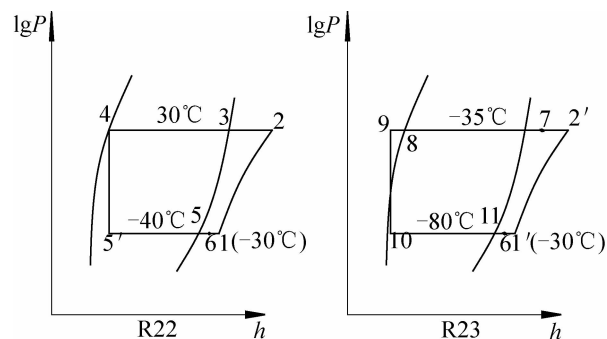


图4 自动复叠制冷系统 $\lg P$ - h 图

Fig. 4 The $\lg P$ - h of automatic cascade refrigeration system

由于设计中有两种制冷剂, 所以经计算得壳体直径分别为 $D_1 = 203$ mm, $D_2 = 147$ mm。这里设计取壳体直径为 203 mm。

按《压力容器规范》^[6], 设计中平板封头的计算厚度由公式(6)得出:

$$\delta_p = D \sqrt{\frac{Kp}{[\sigma] \cdot \varphi}} \quad (6)$$

式中: δ_p 为平板封头的计算厚度, mm; D 为计算直径, mm; K 为与平板结构有关的结构特征系数, 查文献[6]表 5~9 取 $K = 0.2$; p 为设计压力, MPa, 取 $p = 2.0$ MPa; $[\sigma]$ 为材料在设计温度下的许用应力, MPa; 查文献[6]GB150.2 设计温度为 20℃ 时 $\sigma^{20} = 190$ MPa; φ 为焊接接头系数, 查文献[6]GB150.1 取 $\varphi = 1$ 。

根据上述 2 个壳体直径计算得到平板封头的计算厚度为: $\delta_{p1} = 9.3$ mm, $\delta_{p2} = 6.74$ mm。设计取计算厚度为 10 mm, 满足压力容器的结构要求。

根据计算结果, 这里设计的冷凝过滤分离器采用 $\Phi 219 \times 8$ mm 的 20# 无缝钢管外加厚度为 10 mm 的两盲板焊接制作而成。因此具有结构简单、制造方便的优点。

2.2 多级冷凝过滤分离器丝网除沫器设计

丝网除沫器(又称捕沫器、捕雾器)在化工上常用于分离各种汽液混合物中直径大约 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的液滴, 其工作原理如图 5 所示。

当带有液沫的气体以一定的速度上升, 通过架在格栅上的金属丝网时, 液沫与细丝碰撞而粘附在细丝的表面上。细丝表面上的液沫进一步扩散及液沫本身的重力沉降, 使液沫形成较大的液滴沿着细丝流至它的交织处。液滴越来越大, 直至其自身的重力超过气体上升的浮力和液体表面张力的合力时, 液滴就被分离而下落, 流至容器底部。装置采用的丝网除沫器材料为 1cr18ni9ti 型高效不锈钢丝, 实物如图 6 所示。

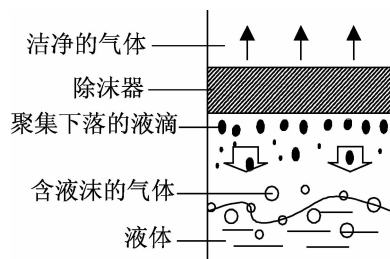


图5 丝网除沫器工作原理示意图

Fig. 5 The schematic drawing of screen mesh skimmer about working principle



图6 1cr18ni9ti 型丝网除沫器实物图

Fig. 6 The real figure of screen mesh skimmer with 1cr18ni9ti

2.3 多级冷凝过滤分离器离挡板设计

在分离器进行汽液混合物分离的时候, 丝网除沫器的上下两侧有压差, 为了防止它来回窜动, 需要对其位置进行固定; 同时考虑到分离效果, 故设计了伞

型罩分离挡板,对非共沸混合工质起到辅助分离作用。考虑到分离阻力及分离效率等因素,将伞型罩排气孔的下侧孔直径设置为 $\Phi 10\text{mm}$,上侧孔直径设置为 $\Phi 8\text{mm}$,伞型罩分离挡板的倾斜度为 30° 。图 7 为伞型罩分离挡板单个排气孔图,图 8 为伞形罩分离挡板实物图。

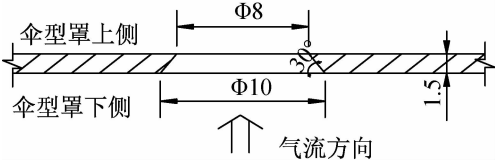


图 7 伞型罩分离挡板单个排气孔图

Fig. 7 The figure of separation damper with umbellate shape and single vent



图 8 伞型罩分离挡板实物图

Fig. 8 The real figure of separation damper with umbellate shape

3 多级冷凝过滤分离装置实际应用性能
的实验研究

按图 9 所示搭建自动复叠制冷循环系统的实验台。混合制冷工质 R23 和 R22 的质量配比为 1:2,选用丹佛斯生产的美优乐型全封闭式压缩机,型号为 MT50,额定输入功率为 3087W。冷凝器采用上海金

典制冷实业有限公司生产的水冷满液式冷凝器,型号为 JG-WN-9.2。冷柜体净尺寸为 $460\text{mm} \times 460\text{mm} \times 710\text{mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),保温材料为 150mm 厚的聚苯乙烯泡沫。冷柜内实验初始运行温度为 15°C 。

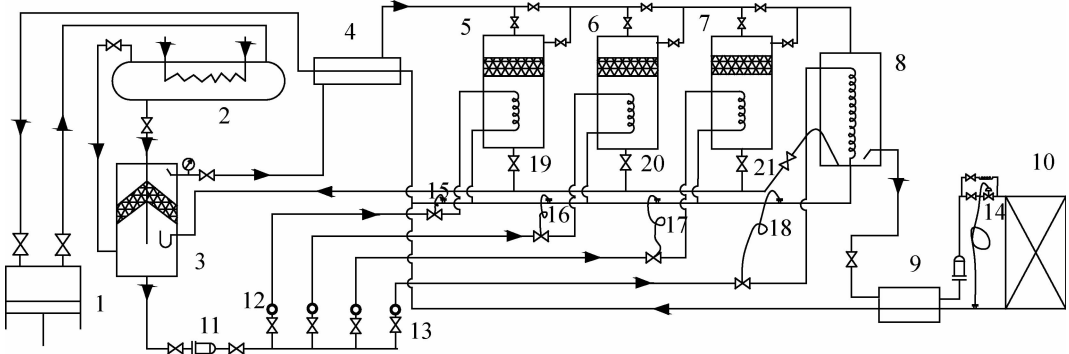
3.1 实验用自动复叠制冷系统工作流程

混合制冷工质进入压缩机 1,压缩后产生的高温高压蒸汽进入水冷式冷凝器 2。在冷凝器中,大部分 R22 的气体被冷凝下来变成液体,从水冷式冷凝器 2 的底部流出进入贮液式分离器 3 的上部;被冷却的 R23 气体和少量的 R22 气体,则从水冷式冷凝器 2 的顶部流出进入贮液式分离器 3 的下部。

在贮液式分离器 3 中, R23 气体和少量的 R22 气体在 3 内由下向上,经过伞型罩分离挡板和丝网除沫器进行初次分离,使气体中夹带的少量液体被分离出来,回落到贮液式分离器 3 的底部,经过初次分离的混合气体则由贮液式分离器 3 上部经回热器 4 过冷后进入一级冷凝过滤分离器 5 之中;大量的 R22 液体聚积在贮液式分离器 3 的下部,并从分离器底部排出,经过滤器 11 给调节站 13 供液。

混合气体在冷凝过滤分离器 5 中经过冷凝和过滤分离,被冷却下来的 R22 液体聚积在 5 的底部,通过手阀 19 的开启使 R22 液体回流到贮液式分离器 3 之中;极少量的 R22 和所有的 R23 气体同样经过伞型罩分离挡板和丝网除沫器分离后从分离器 5 的上部排出。

为了得到更进一步的提纯,冷凝过滤分离器 5 排出的气体可以通入二级冷凝过滤分离器 6 或者三级冷凝过滤分离器 7 中进行再次的分离,也可以依次通入二级、三级冷凝过滤分离器进行第二、三次分离。经过多级冷凝过滤分离后,排到冷凝蒸发器 8 中的气体基本上为 R23 气体,从而实现了 R22 和 R23 的分离。在冷凝蒸发器 8 中 R23 气体被冷凝成液体,经



1 压缩机 2 水冷式冷凝器 3 贮液式分离器 4 回热器 5~7 三级冷凝过滤分离器 8 冷凝蒸发器
9 回热器 10 冷柜 11 干燥过滤器 12 液视镜 13 液体调节站 14~18 热力膨胀阀 19~21 手动阀

图 9 自动复叠制冷系统循环流程图

Fig. 9 The flow chart of automatic cascade refrigeration system

过回热器9过冷后给冷柜10供液,从而使冷柜达到较低的蒸发温度。

5、6、7、8的内部盘管冷凝供液是由液体调节站13提供的,制冷工质为高沸点的R22液体,R22和R23蒸发后的回气混合后被压缩机抽回,又开始重复循环。

3.2 实验结果

为了达到满意的降温要求和检测该装置的实际应用性能,做了多次实验,结果表明,该实验装置达到了较低的冷柜温度,降温曲线如图10所示。

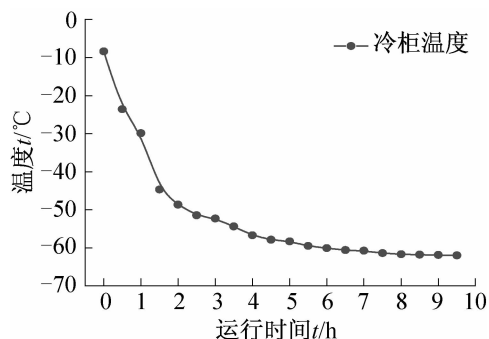


图10 低温冷柜降温曲线

Fig. 10 The cooling curve of low temperature refrigerator

在实验中观察到:低温冷柜在运行2h之内,冷柜温度迅速下降到 -50°C ;运行6h后,温度缓慢下降到 -60°C ;实验运行8h后,温度下降的幅度趋于平稳,最后实验装置稳定在 -62.0°C 左右。为了确定装置的分离效率,将分离后的组分采样后,用气相色谱法对样品中各组分的含量进行检测,结果表明该装置可使低沸点气体纯度达到98%,达到了高效分离。

4 结论

传统汽液分离器或存在分离效率低、制冷效果差,或存在结构设计复杂、成本较高的问题。与传统分离装置相比,这里设计的新型多级冷凝过滤分离装置分离效率得到极大提高,结构简单、成本较低,具有极强的生产实用性,目前已获得国家专利^[7]。这里将该装置用于自动复叠制冷循环系统中,对传统循环进行改进。新循环以非共沸混合制冷剂R22和R23作为制冷工质,只使用一台单级蒸汽制冷压缩机,采用多级冷凝过滤分离装置实现高低沸点组分及润滑油的有效分离。在对该循环的性能通过实验作了系统研究之后,得到以下结论。

1)实验系统采用新型多级冷凝过滤分离装置、

只使用一台单级压缩机实现了非共沸制冷工质自动复叠,将冷柜内的温度降低并稳定在 -62°C 。

2)首次提出的多级冷凝过滤分离装置可使混合工质分离纯度达到98%,且分离装置结构简单、成本较低,具有更强的生产实用性。

3)采用文中提出的多级冷凝过滤分离装置改进后的自动复叠制冷循环系统,能效比和稳定性都得到极大提高,对国内自动复叠制冷循环系统方面的研究起到了一定的借鉴作用。

参考文献

- [1] 王起霄,王莹,孙颖,等.一种新型大容积低温箱的研制[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2004(4):487-489. (Wang Qixiao, Wangying, Sun Ying, et al. Study on a kind of new type low temperature cabinet with big volume[J]. Journal of Harbin University of Commerce(Sciences Edition), 2004(4):487-489.)
- [2] 吴邦喜.单级压缩非共沸工质低温制冷装置的研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2007.
- [3] 尤大海.新型高效折板分离器原理与应用[J].化肥设计,2003,41(2):47-48. (You Dahai. The principle and application of new and high efficiency s-shaped plate separator[J]. Chemical Fertilizer Design, 2003, 41(2):47-48.)
- [4] 李文林,华小龙.混合工质制冷循环的实验研究[J].流体工程,1987(4):53-55. (Li Wenlin, Hua Xiaolong. Experimental research on refrigerant mixtures of refrigeration system[J]. Fluid Engineering, 1987(4):53-55.)
- [5] 商业部设计院.冷库制冷设计手册[M].农业出版社,1988.
- [6] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB150.1~150.4—2011 压力容器规范[S]. 2011.
- [7] 王起霄,王莹.非共沸混合制冷工质高效自动分离装置:中国,ZL,200820210170. 2[P]. 2009-09-30.

作者简介

王莹,女(1971-),工学博士,教授,哈尔滨商业大学能源与建筑工程学院,E-mail:hrbwangying000@sina.com.研究方向:制冷装置研究、食品冷冻冷藏、节能型冷热源设备设计。

About the author

Wang Ying(1971-), female, D. E., Professor, College of Energy and Civil Engineering, Harbin University of Commerce, E-mail:hrbwangying000@sina.com. Research fields: The research of Cooling device; Low-temperature cold chain; The design of energy-saving device of cooling and heating source.