

氟利昂 / 二氧化碳复叠式制冷系统应用实践

徐 勇 杨 帅 王 敏

(云智冷(杭州)冷链发展有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要: 湖南云冷 1 号冷库氟利昂 / 二氧化碳复叠式制冷系统应用实践, 根据各库区的使用功能特点选择合适的制冷系统, 采用环保制冷剂, 低温采用自然冷媒二氧化碳, 高温采用 R507A; 应用高效的二氧化碳制冷系统满足冷库快速降温对低温大冷量的需求; 完善的高安全性及可靠性设计; 符合节能环保和安全的要求。

关键词: 冷链系统设计应用; 氟利昂 / 二氧化碳复叠式制冷系统; 安全控制; 节能环保

一、设计应用目的:

随着商品的丰富和社会的发展, 人们对食品的质量越来越重视。人们对食品的加工过程和流通过程给予更多的关注。冷产品的加工、流通、销售过程更复杂, 且对其温度有严格的要求。通过建立企业低温物流系统, 有效保障食品质量, 且尽可能地降低企业的物流成本。

同时冷库制冷系统设计也在很大程度上决定了冷库运营成本费用, 在本次应用实践中, 将以湖南云冷 1 号为代表, 采用氟利昂 / 二氧化碳复叠式制冷系统推动加速冷库的技术改造、经营管理和全方位服务工作, 提高冷库利用率和社会服务性, 降低冷库运行电费成本, 满足环保性 (GWP, ODP)。

二、进一步展开的研究:

本次湖南云冷 1 号冷库设计应用实践将采用氟利昂 / 二氧化碳复叠式制冷系统。末端采用冷风机及顶排管两种蒸发器。随着人们对能源危机的意识不断增强, 冷库制冷系统的节约能源问题越发得到重视, 在冷库质量系统设计应用实践中, 将会重点围绕节能环保等方面展开进一步的研究。

三、工程概况及特点

1. 项目特点: 对本项目分析后总结以下特点需重点考虑:

(1) 冷库库温以 -18°C 低温库为主, 二~六楼为 -18°C 低温库, 七楼为 0°C 高温库;

(2) 冷库总高度 49.5 米, 需解决制冷剂在垂直方向的输送

问题;

(3) 第二~六层采用桶泵供液, 二~四层末端采用顶排管形式制冷, 五~六层末端采用冷风机形式制冷;

(4) 第二~四层采用顶排管, 顶排管的化霜方式采用手动热气化霜方式;

2. 根据项目特点, 制定本项目的主要设计原则:

(1) 采用环保制冷剂, 低温采用自然冷媒二氧化碳, 高温采用 R507A 制冷剂;

(2) 应用高效的二氧化碳制冷系统满足冷库快速降温对低温大冷量的需求;

(3) 完善的高安全性及可靠性设计, 二氧化碳制冷系统配备完整的安全保护系统 (CO_2 浓度探测报警, 安全泄压保护等), 每个库房设置两套 CO_2 浓度检测装置, 上下各一套 (六层除外);

(4) 尽量减少系统二氧化碳的充注量, 符合节能环保和安全的要求。

四、制冷系统划分依据

制冷系统的合理划分是设计方案的基础: 初分依据: 同一温度带划分一个系统。细分依据之一: 尽量使同一功能区、同一使用管理部门一个系统。细分依据之二: 根据现场机房和管路布置条件划分系统: 节约管路, 减少压力损失。细分依据之三: 相近周转量和周转周期的冷库划分一个系统: 针对相近周转量和周转周期的冷库划分一个系统, 使机组运转平稳, 不出现频繁启动开停的情况, 延长机组使用寿命。

综合确定: 综合以上 4 点, 再以高安全可靠→高稳定性→节能→精确控制→降低投入成本→低维护成本, 为设计指导思想, 最终确定系统划分。冷间负荷计算说明

五、方案亮点

①节能优势: 在相同的蒸发温度 (-30°C) 和冷凝温度 (35°C) 下, R744/R507A 复叠低温制冷系统的 COP 比 R744/R717 复叠的 COP 高 13.8%;

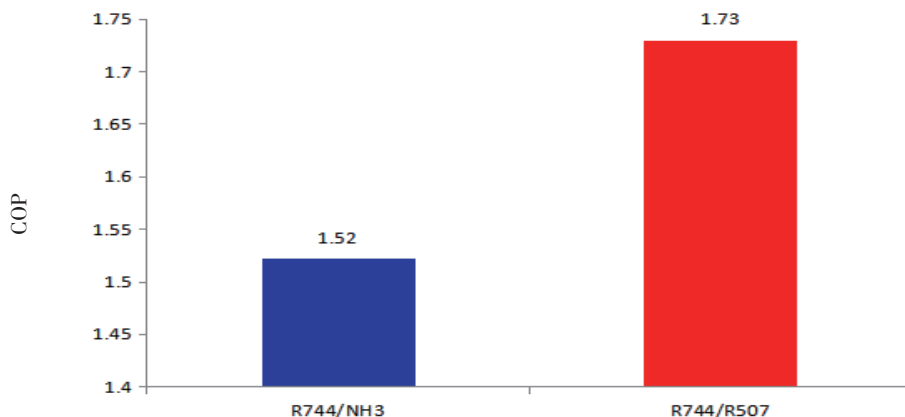


图 1 能效对比图

②安全及环保性：选用安全系数最高的制冷剂，降低二氧化碳的充注量，减少安全风险。

③选用安全系数最高的制冷剂制制冷剂选用 A1 类工质，确保冷库运营的安全性。

④可靠性：增加压缩机台数，应用数字变频技术增强系统负荷调节能力，提高系统可靠性和设备运行寿命

对于高温系统，本方案用并联螺杆压缩机组替代大型开式螺杆机组：

①采用并联技术控制的压缩机组更能精确的调节负荷，并且在调节负荷时，整个机组的运行效率不变；而大型单螺杆机组在满负荷运行时效率较高，但在部分载荷的情况下效率急剧下降，对负荷变化的调节能力有限；且在低负荷运行时很可能因为流量太小导致压缩机线圈温度过高而烧毁线圈；

②并联机组在个别压缩机出现故障时，仍然可以工作制冷，可靠性高，单机头螺杆机组一旦出现故障或维护保养将造成整个冷库停运，可靠性差；

并联机组智能化控制，每台压缩机轮流工作，寿命长，冲击小，每台压缩机都在额定工况下运行，效率最高而且结构紧凑。

对于低温系统，本方案用二氧化碳活塞并联机组替代开式螺杆机组：

①由于二氧化碳系统高低压压差大，螺杆靠油密封不适用于 CO₂，容易产生泄漏；当今世界上最大的二氧化碳压缩机厂如比泽

尔和都灵都不生产螺杆 CO₂ 压缩机，而生产二氧化碳活塞机；

②二氧化碳压力相对较高，开式压缩机轴封泄漏较重。经常需要大修；二氧化碳活塞压缩机采用的半封闭模式，电机和轴承位于封闭的缸体内，在高压差下能够达到很好的密封效果，不会出现开式二氧化碳螺杆压缩机轴封泄漏的问题；

③并联压缩机组加变频的设计可以根据载荷多级精确调节冷量。全范围保持最佳匹配从而稳定高效。

综上所述，复叠系统在高温采用高效螺杆并联机，在二氧化碳低温段采用活塞并联，综合能效最高。

(一) 系统设计及系统运行原理

复叠制冷系统设计采用专用 CO₂ 系统设计软件进行，确保系统各关键部件的匹配最优化，从二氧化碳储液器出去的 -5℃ 的液态二氧化碳经过管路输送到达气液分离器，经过节流作用，变为低压低温的两相混合物，再通过二氧化碳循环泵及管路将低温液体输送到排管中蒸发变为二氧化碳的两相混合物，经过回气管路，回到气液分离器，其中气体被亚临界的二氧化碳压缩机吸入并进行压缩，经过压缩后的低压二氧化碳蒸汽变为高温高压的二氧化碳过热蒸汽，在中间的冷凝蒸发器中与 R507A 进行换热，最后冷却为二氧化碳液体。采用专业的二氧化碳复叠系统设计软件经过对二氧化碳系统和 R507A 系统的热力计算，计算结果确定冷风机，压缩机组，冷凝器，中间冷却器，高温机组，蒸发冷凝器等主要部件后，结合施工平面图，进行管路设计。

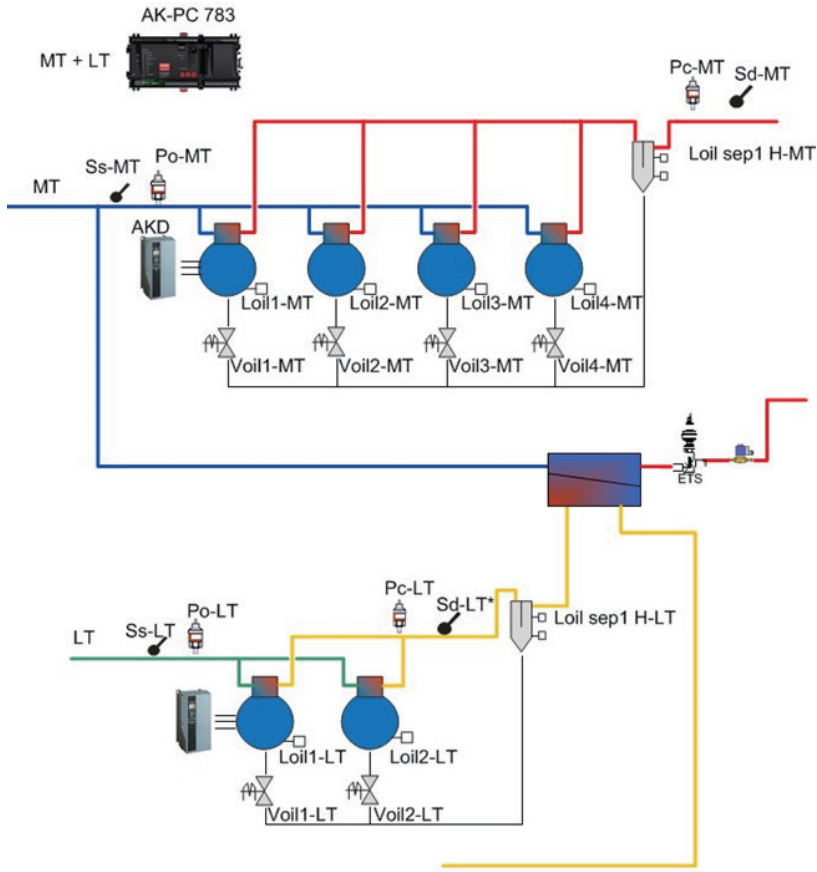


图 2 二氧化碳 /R507A 复叠制冷系统图

（二）冷凝器选型与性能技术说明

冷凝器的散热效率对系统的性能影响很大，特别是当地夏季高温的气候条件下，合理选择冷凝器的形式和散热量，有助于提高系统运行效率和提高系统的可靠性，根据项目要求，本项目选用节水节电的蒸发式冷凝器，以减少系统维护的难度，提高运行的可靠性。

（三）CO₂ 冷凝蒸发器选型与性能技术说明

复叠制冷系统由两套独立循环的制冷系统组成，两套系统之间通过冷凝蒸发器实现高、低温级之间的连接，冷凝蒸发器既作为高温级的蒸发器、又作为低温级的冷凝器。设计高效冷凝蒸发器不但有效减小其本身的换热面积，降低换热器占地面积及制造成本，而且在系统运行时减小两级之间的换热温差，提高高温级

蒸发压力并降低低温级的冷凝压力，从而降低系统的整体能耗。

本项目冷凝蒸发器采用 SWEP 高效板式换热器，设计最大运行压力 45bar，介质流动阻力小，设计换热温差 5K，氟系统侧设计过热度为 10K，大大降低氟系统侧压缩机吸气带液的风险。

（四）系统管道选型与性能技术说明

制冷系统工程管道采用无缝钢管，由于二氧化碳制冷系统的管路系统承受比传统冷媒制冷系统更高的压力，其管路选型计算更为严格。本方案严格根据 EN 14276-2: 2006 标准，对二氧化碳制冷系统的压力管道 DN≤100mm 的安全系数设置为 3。

（五）二氧化碳复叠制冷系统自动控制

R744/R507A 复叠系统的自动控制

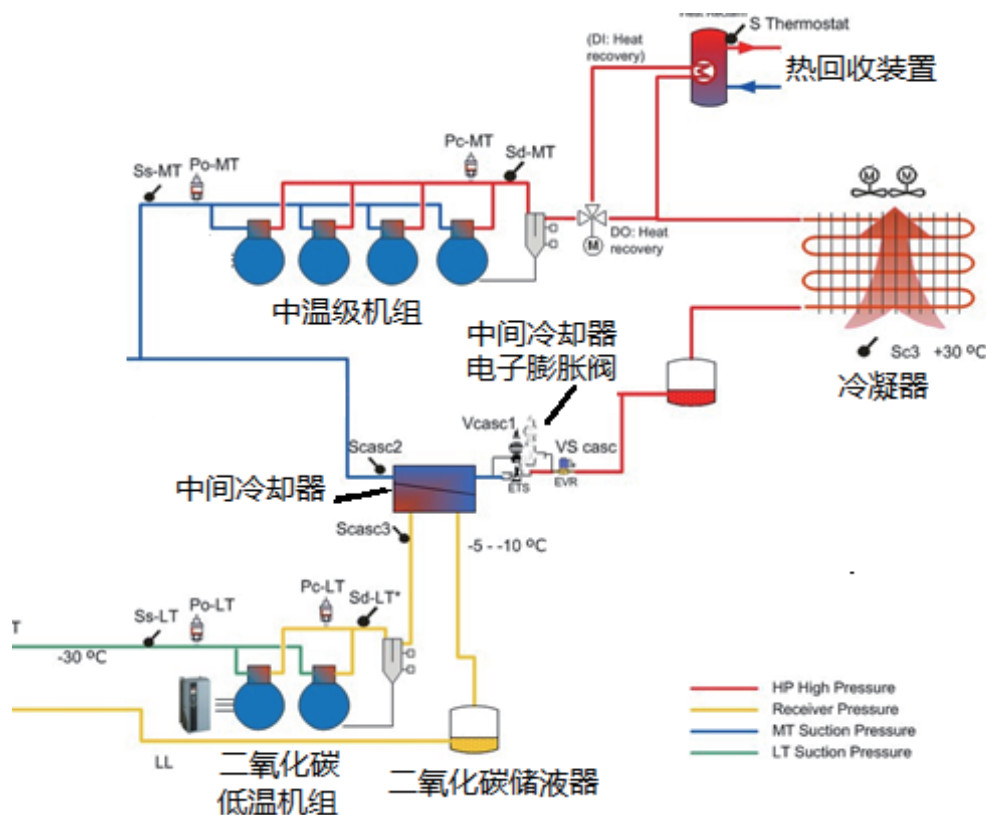


图 3 R744/R507A 复叠系统图

复叠系统的运行需要低温系统和高温系统同时运行，并通过中间冷凝蒸发器连接。

运行控制过程如下：低温压缩机组发出开机请求，高温压缩机接收低温开机请求，高温压缩机反馈释放低温压缩机，低温压缩机接收释放开机信号后，低温压缩机开启，中间冷却器的电子膨胀同时开启往中间冷却器提供 R507A 用于冷却二氧化碳，R507A 在中间冷却其中变为低温低压的蒸汽，二氧化碳高温高压的蒸汽在中间冷却器中冷却为二氧化碳的高压液体。

⑦集中控制系统

整个系统配备一套 EMS 能量管理系统（主控制器），对所有制冷系统的设备进行集中管理，显示所有制冷设备运行状态，采集所有制冷设备报警信息并进行储存，主控制器可通过路由器与

电脑相连，并配置计算机软件，实现动态显示，实现远程控制及显示。采用集中监控和微电脑控制器，采用的电子控制器是丹佛斯 ADAP-KOOL。

六、安全性设计

（一）安全装置

在任何情况下二氧化碳制冷系统的安全装置都不得被旁通、操纵改造或解除。

1. 紧急停止开关

紧急停止开关设置在机房外，在危险事故发生时可关掉整个系统（正常关闭时不得使用）。

2. 二氧化碳浓度监测

①在无固定通风装置的库房内与机房内设置并安装二氧化碳

探头。当超出允许的制冷剂浓度时，系统将发出声光警报，使现场人员及时撤离。

②二氧化碳探头设置在制冷剂泄漏时可能积聚的地方：机房、地下室或地势低的房间，以及任何有人的房间，每间至少设置 1 个（本项目每间冷藏库房设置 1 个探头，机房设置 1 个）。当 CO₂ 制冷剂浓度超过标准 EN 378-1：2008 所规定的极限值时，二氧化碳探头须触发报警装置并激活机房中的紧急机械通风设备。二氧化碳探测器的位置须设置在系统最容易引起泄漏的部位。

3. 安全阀

CO₂ 制冷系统设置主安全阀和辅助安全阀以防止制冷系统内部产生不被允许的压力迅速升高故障。

主安全阀（40 Bar）

主安全阀保护压缩机吸气侧（箱体）、储液罐、蒸发器、过冷器、管路、阀门等。主安全阀处于永久激活状态，其出口设置在吸气管路和储液罐处并通过管路连接到系统，触发时释放二氧化碳到大气中，装置在现场主安全阀在现场设置时要求：

七、可靠性设计

（一）冷风机的可靠性方案设计

1. 冷风机的选型：整个制冷系统的可靠性取决于系统高低压的压比和压缩机排气温度，因此在冷风机设计选型时，依据降低压比、降低排气温度的原则，冷风机选用小温差设计，并且为了保证系统回气正常过热，冷风机的制冷量选型留有 10~15% 的余量。

2. 二氧化碳冷风机的压力设计：二氧化碳冷风机在运行时承受比氟利昂冷风机更高的运行压力，高温设计最大运行压力 40Bar。因此翅片式盘管应经过特别设计：铜管采用 12.7mm 的光管，

铜管厚度 0.75mm，且盘管出厂前必须经过严格的打压测试确保能够安全工作；

3. 冷风机配件的可靠性设计：冷风机零配件的可靠性也直接影响冷风机的可靠性，因此选择高标准的配件同样重要，本项目的冷风机的零部件经过严格选择，风扇采用德国施乐百风机或者 EBM 风机；钣金采用 1.5mm 以上宝钢热镀锌板，表面喷塑处理，并经过严格的盐雾实验，确保钣金的耐腐蚀性能。

（二）压缩机组可靠性方案设计

1. 压缩机组提供了全面的保护功能，可以对压缩机的吸气压力、电压、排气温度、压缩机过热、高低压、和油位等进行监控和故障报警。

2. 机组结构经过严格的振动测试和优化，达到核工业部的抗震标准，是我国国内唯一具备核电资质的压缩机组。

3. 回油系统采用高效油分装置，配合系统动态回油设计，确保系统稳定高效的润滑。

4. 压缩机采用多机头并联，各个机头互为备用，大大降低制冷系统瘫痪的可能性；

（三）冷凝器可靠性方案设计

冷凝器选用的方案设计中，采用选小温差 / 大冷凝器的设计原则，确保高温可靠性：在冷凝能力上具备较大的安全余量，确保高温下系统的可靠性。同时在低温环境下，通过控制水泵和风扇的启停控制系统以控制冷凝压力，确保低温下系统能够保持足够高的供液压力和足够高的排气温度和供油温度。

八、营成本与高效节能

（一）系统的节能

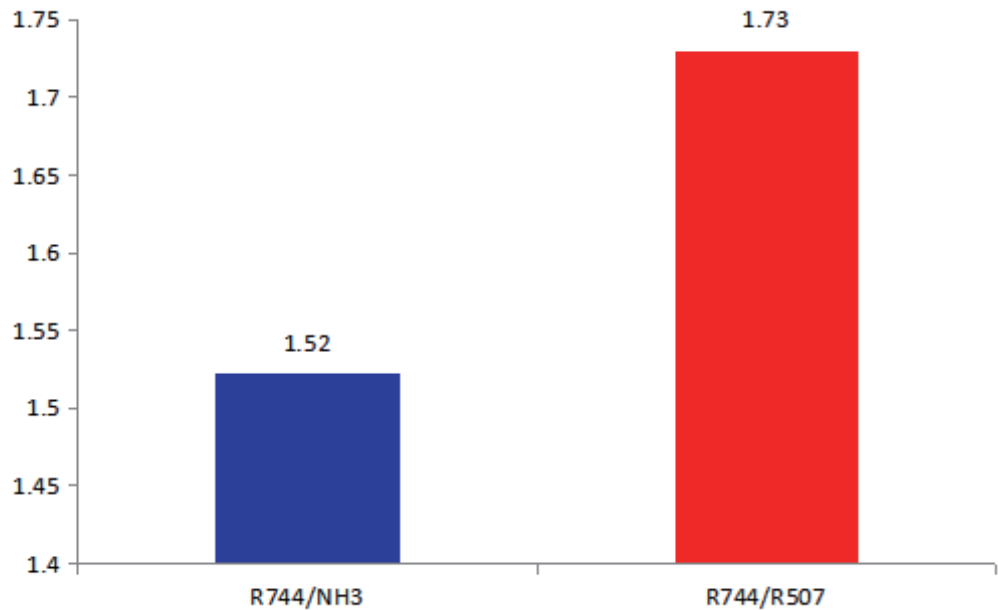


图 4 COP 对比示意图

在相同的蒸发温度（-30℃）和冷凝温度下（35℃），R744/R507A 复叠制冷系统的 COP 比 R744/R717 复叠制冷系统的 COP 高 13.8%；

（二）控制节能

压缩机组高低压全部采用浮动压力控制，保证压缩机在最佳压比下工作。提高系统的运行效率。

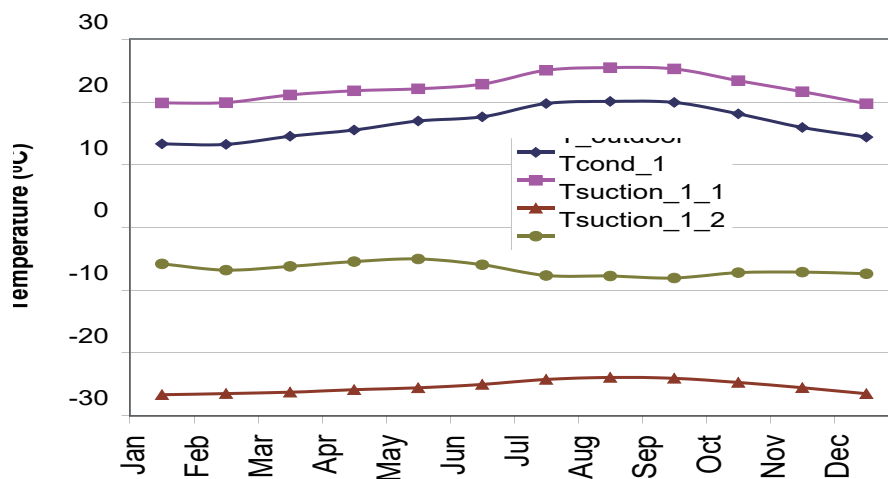


图5 控制节能效果示意图

(三) 其他节能措施

1. 高温系统自然融霜：由于高温系统采用高效小温差的蒸发器，使得结霜率降低，融霜效率大幅度提高，本方案采用自然化霜，简化了系统，节省化霜电耗，同时提高了系统的可靠性。为避免极限工况下融霜不尽的风险，所有冷风机配备小功率加热管以确保系统的可靠性。

2. 压缩机变频和并联相结合：该方案结合了并联机组分级能量调节和变频压缩机无级卸载的优点，可实现高效大范围分级卸载，并联机组结合螺杆机小范围的无级卸载，在最大程度上实现能量的准确控制，保证系统稳定经济运行。

九、冷库应用实践结论

月度用电统计表（10月27~11月27日）

表1 月度用电统计表

排管库用电量	低温风机库用电量	冷冻库用电量	中温风机库用电量	总用电量
kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
129465	143436	272901	20023	292924

十、结论

本实践项目氟利昂/二氧化碳复叠式制冷系统采用环保制冷剂，应用高效的二氧化碳制冷系统满足冷库快速降温对低温大冷量的需求，尽量减少系统二氧化碳的充注量，符合节能环保和安全的要求。

对于高温系统，采用并联螺杆压缩机组替代大型开式螺杆机组：采用并联技术控制的压缩机组更能精确的调节负荷，并且在调节负荷时，整个机组的运行效率不变；并联机组在个别压缩机出现故障时，仍然可以工作制冷，可靠性高；并联机组智能化控制，每台压缩机轮流工作，寿命长，冲击小，每台压缩机都在额定工况下运行，效率最高而且结构紧凑。

本方案在设计要求的基础上，对制冷系统进行了优化设计，具有节能优势：在相同工况下 R744/R507A 的复叠系统的能效比 R744/R717 (NH₃) 复叠系统高。在相同的蒸发温度 (-30℃) 和冷凝温度 (35℃) 下，R744/R507A 复叠低温制冷系统的 COP 比 R744/R717 复叠的 COP 高 13.8%；

对于低温系统，本方案用二氧化碳活塞并联机组替代开式螺杆机组：由于二氧化碳系统高压压差大，螺杆靠油密封不适用于 CO₂，容易产生泄漏；二氧化碳压力相对较高，开式压缩机轴封泄漏较严重。经常需要大修；二氧化碳活塞压缩机采用的半封闭模式，电机和轴承位于封闭的缸体内，在高压差下能够达到很好的密封效果，不会出现开式二氧化碳螺杆压缩机轴封泄漏的问题；并联压缩机组加变频的设计可以根据载荷多级精确调节冷

量，全范围保持最佳匹配从而稳定高效。

综上所述，本次氟利昂/二氧化碳复叠式制冷系统设计方案采用复叠系统在高温采用高效螺杆并联机，在二氧化碳低温段采用活塞并联，综合能效最高。

参考文献：

- [1] 冷库设计标准：GB50072-2021. (Standard for design of cold store: GB50072-2021)
- [2] 冷库制冷设计手册：商业部设计院编. 北京：农业出版社. 1991. (Refrigeration design manual of cold storage: Edited by Design Institute of Ministry of Commerce. Bei Jing. Agricultural Press. 1991)
- [3] 制冷设备、空气分离设备安装工程施工及验收规范：GB50274-98 (Code for construction and acceptance of refrigeration equipment and air separation equipment installation engineering: GB50274-98)
- [4] 冷藏库建筑工程施工及验收规范：SBJ11-2000 J42-2000. (Code for construction and acceptance of cold storage building engineering: SBJ11-2000 J42-2000)
- [5] 通用用电设备配电设计规范：GB 50055-93 (Code for design of power distribution of general electric equipment: GB 50055-93)
- [6] 公共建筑节能设计标准：GB50189-2005. (Design standard for energy efficiency of public buildings: GB50189-2005)