



R290家用空调能效改进途径解析

北京工业大学 马国远

2024.4.8



目录

一、背景

二、整体化与新型换热器

三、水环路间接冷却

四、低温适应性研究

五、主要结论

一、背景

1、R290应用的必要性

- 2016年10月达成《蒙特利尔议定书》**基加利修正案**，正式宣布未来几十年分批次削减HFCs制冷剂的产量，以实现在本世纪末减少全球升温0.5°C的目标。
- 2021年9月15日，基加利修正案对我国正式生效，2024年是我国HFCs生产与消费冻结年，从2029年开始逐年削减，到2045年达到削减80%的目标。
- 基加利修正案的实质是消减，即降低工质的GWP值和用量，这是与CFCs和HCFCs制冷剂替代的根本不同。

基加利修正案和F-gas法规的相继颁布，使得R290须在未来五年内成为欧洲市场主流制冷剂



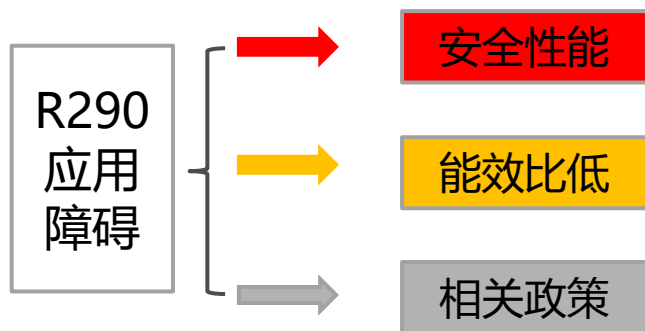
我国作为家用空调器**全球生产基地**，制冷剂技术的应用应以欧美地区为准，R290空调器应用技术的研发刻不容缓





一、背景

2、R290应用的主要障碍



R290制冷剂作为A3类制冷剂，在家用空调器中的直接应用存在风险，现阶段其应用的主要障碍是**安全性**，其次是能效比低，而非没有相关政策。

序号	名称	ODP	GWP	主要应用领域	被替代的物质名称
1	R290	0	< 1 ³	房间空调器、家用热泵热水器、商用独立式制冷系统、工业用制冷系统	R22
2	R600a	0	< 1 ³	商用独立式制冷系统	R22
3	R744	0	1 ³	家用热泵热水器、工业或商业用热泵热水机、工业或商用制冷系统、冷库	R22
4	R717	0	0 ⁵	工业用制冷系统、冷库、压缩冷凝机组	R22
5	R32	0	675 ²	单元式空调机、冷水机组、工业或商用热泵热水机	R22
6	R161	0	5 ³	房间空调器	R22
7	R436C	0	1 ⁴	房间空调器	R22



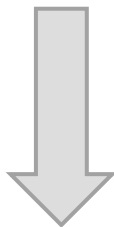
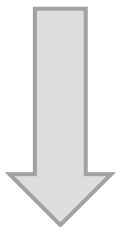
一、背景

3、R290应用的必要条件

安全性高：空调首先是安全的，即基于提升空调安全性的总方针，设计/研发安全性高的空调器结构或型式。

能效比高：空调安全前提下的高性价比，即在安全的结构基础上提升性能、降低造价，提升性价比。

从安全性的角度来看，**整体化、间冷化**以及**新型换热器**等手段的应用，可以大幅降低减少R290泄漏风险及充注量，避免工质与人物理接触，提升系统安全性。



“二高”缺一不可！

“二高”（安全性高+能效比高），R290空调才能成为主流，并占据主要的市场份额。

从能效提升的角度来看，R290的应用障碍并没有完全解决，须在整体化、间冷化的基础上对系统进行优化或采用有效的能效提升措施。此外，还应关注R290的**低温适应性**的研究。

二、整体化与新型换热器

1、传统的整体式空调器

整体化就是采用整体式结构，即插即用，管路由工厂全部焊好，避免现场接管，其应用的主要形式包括小型除湿机、热泵干衣机、移动空调和窗机。

- 内部体积小，当制冷剂快速泄漏后，内部空间很快被制冷剂占据，制冷剂浓度因此长时间高于燃爆浓度上限，反而**降低了燃爆风险**。
- 内部制冷剂管道短，压降小，制冷剂**充注量小**。
- 存在占地面积大、噪声大等缺点。



(a) 小型除湿机



(b) 热泵干衣机



(c) 移动空调



(d) 窗机

整体式空调主要应用形式

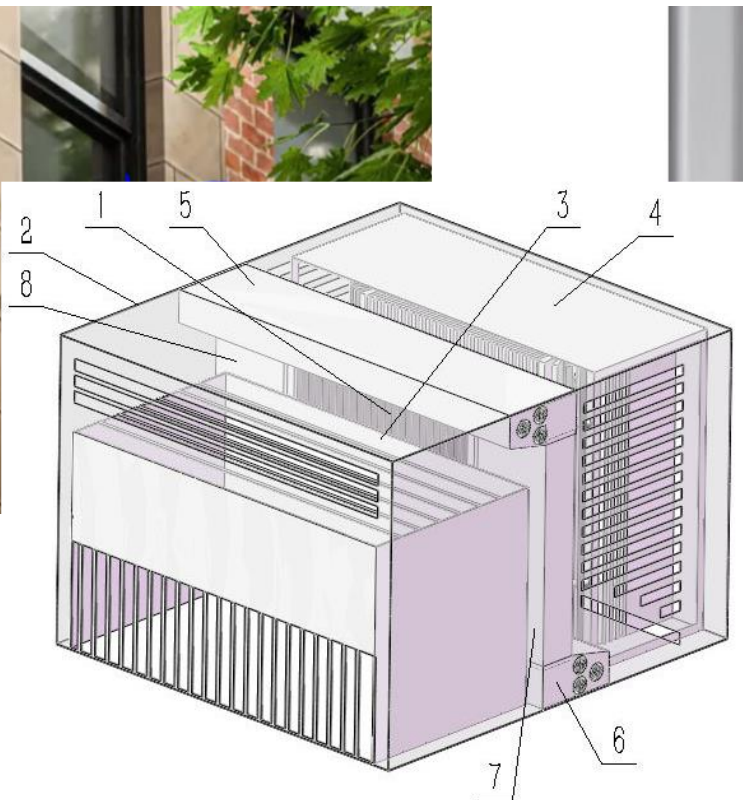
二、整体化与新型换热器

2、可期的整体式空调器

- **整体式空调**：不仅是窗机，分体机结构的整装更可期，会朝着结构多样化发展，未来可期的有：U型窗机和马鞍型机等。
- **整体机+**：主要是+新风，换气既是被动安全措施，也是空调健康功能，是比较合意的R290产品型式。



马鞍型空调器



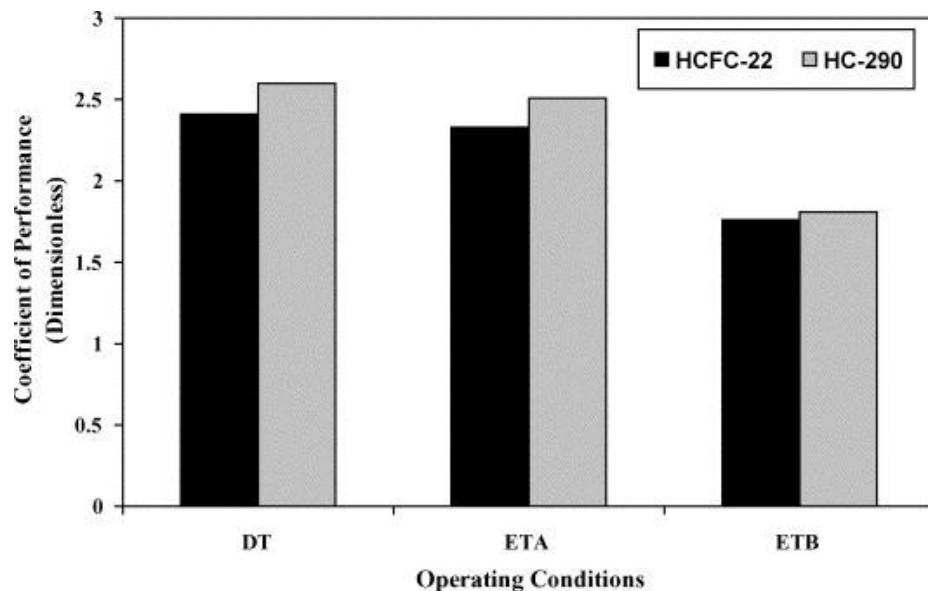
带新风热回收的整体式空调器

- 1-折叠式换热器，2-箱体，3-室内单元，4-室外单元，5-上罩盒，6-下罩盒，7-封板A，8-封板B

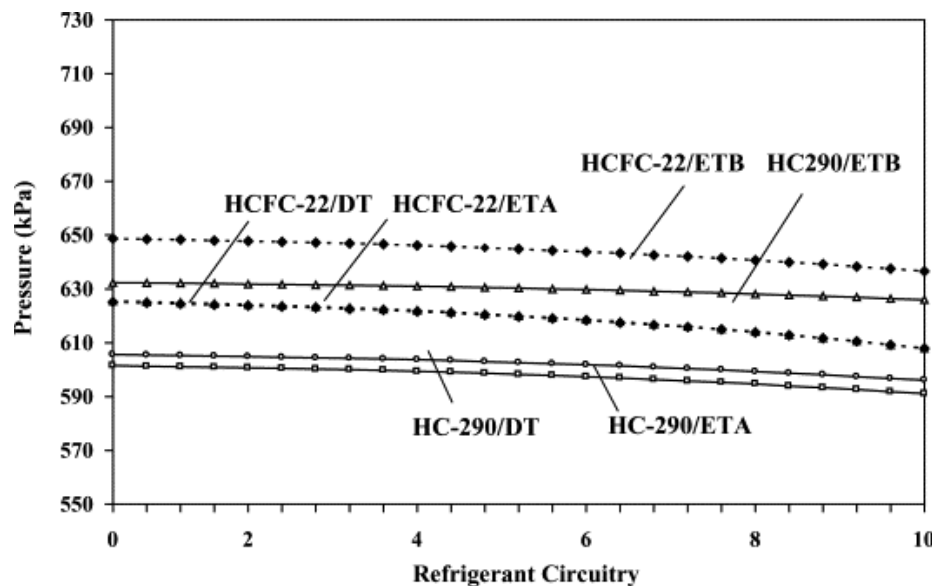
二、整体化与新型换热器

3、整体式空调器性能分析

Devotta等在1.5HP窗式空调中使用R290制冷剂对R22进行替代实验，由于R290系统压比较低，导致其能效比相较R22有较大提升，且系统排气压力有所下降；相比同冷量的分体式空调系统，由于管路较短，使系统制冷剂压降较低，导致R290整体式空调系统的能效比高出5%以上，在此基础上，由于其整体型式的特殊性，新风热回收可作为进一步提升能效的途径。



能效对比图



制冷剂压降对比图

二、整体化与新型换热器

3、整体式空调器性能分析

吴国强等对带新风热回收的R290整体式空调进行实验研究，随着热回收功能引入，制热工况平均COP提高了3.66%，在20/-18℃时系统COP更是提高了6.9%；制冷工况新风功能开启对COP的改善同样较为明显，并且室外气温越高，新风功能对系统性能的提升效果越好。制冷工况平均COP提高的提高程度可达31.7%。由此可见，新风热回收的引入对整体式空调性能带来较大改善。



带新风热回收的整体式空调器

二、整体化与新型换热器

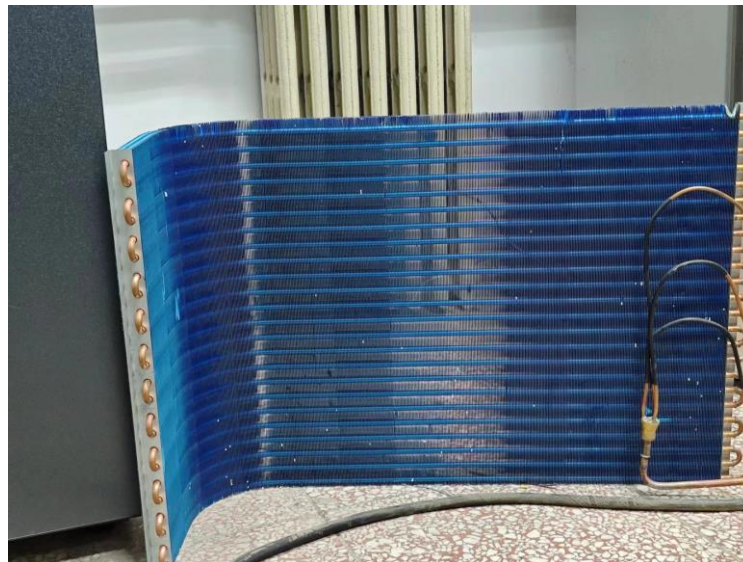
4、小管径换热器介绍

小管径换热器通常指管径 $\leq 5\text{mm}$ 的翅片管换热器，其优势为换热系数较高、能大幅降低工质充注量和金属用量，达到**降本增效**。

小管径换热器的制冷剂**压降**和制冷剂侧**换热系数**都更大，若直接将7mm换热器更换为对应的5mm换热器，通常会造成系统性能的下降。但是，将小管径与**内螺纹管**结合使用，并通过换热器流程优化来降低制冷剂压降，理论上可实现更优的换热性能。



5mm
蒸发器

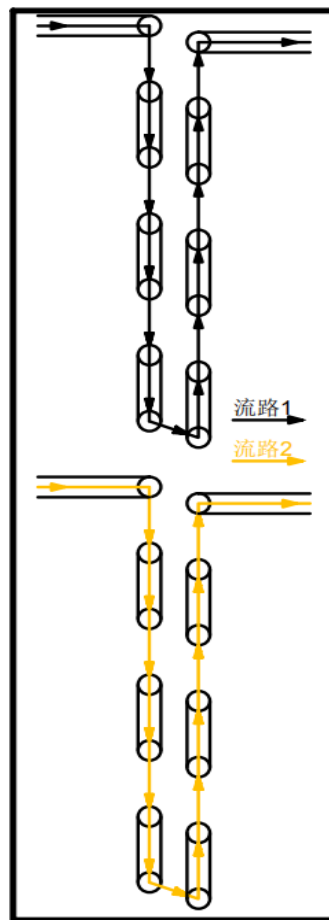


5mm
冷凝器

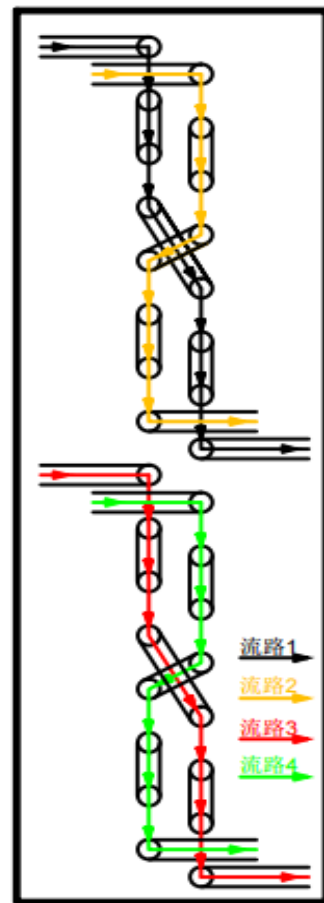
二、整体化与新型换热器

5、小管径换热器性能分析

在保证风侧换热面积一致的情况下，以7mm管径换热器为基础设计出5mm小管径R290空调系统，右图所示为5mm室内换热器的流路分布。其中，**优化前**5mm系统相比7mm系统的制热量平均**下降**了3.5%，这是由制冷剂压降过高所导致，而在**优化后**5mm系统相比原系统的制热量平均**提高**了2.3%，这说明了多流路设计可大幅降低制冷剂压降，且流路**交叉流动**，使换热器均匀换热。



5mm优化前
(原7mm流路)



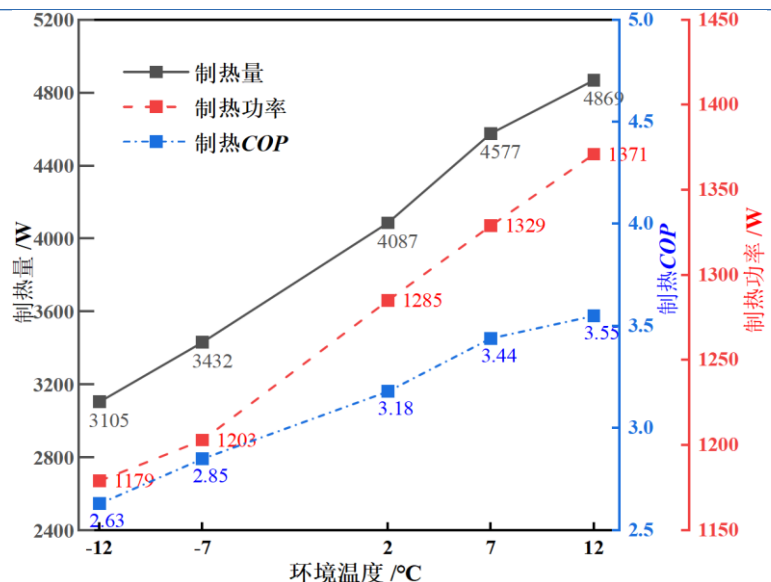
5mm优化后

二、整体化与新型换热器

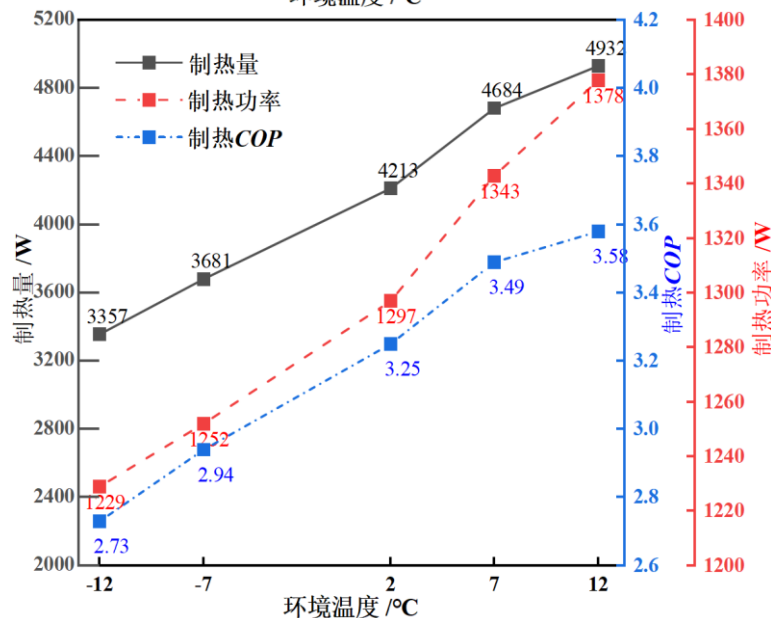
5、小管径换热器性能分析

在制冷剂**充注量相同**时，5mm系统的制冷、制热性能都优于原7mm系统，随环境温度降低，其提升幅度更明显。

当两系统都处于**最佳充注量**时，5mm系统在低温制冷、制热工况时性能**表现更好**，而在高温工况时性能有所衰减，环境温度**43℃**及以上的制冷工况除外，5mm系统的制冷、制热性能全面优于7mm系统。



**7mm
系统制
热性能
(370g)**



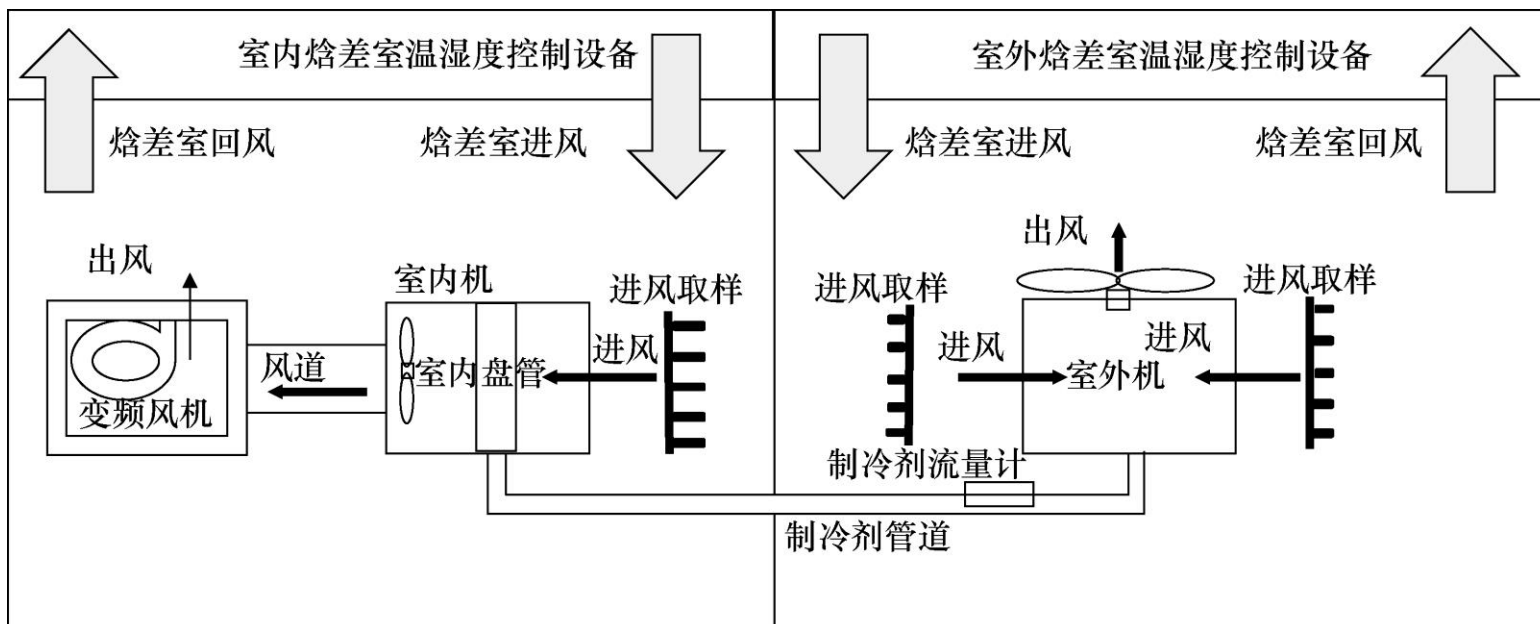
**最佳充
注量降
低16%
以上**

**5mm
系统制
热性能
(310g)**

二、整体化与新型换热器

6、微通道换热器性能分析

密洁霞实验研究了微通道换热器替代翅片管换热器的12kW热泵型空调器性能，与翅片管换热器相比，在同样的制冷能力下，微通道系统的**充注量减少了9%**；制冷能力在额定制冷和中温工况下分别增加1%和1.2%，制热能力在额定制热、额定除霜和低温制热工况下分别**增加1.9%、2.9%和2.5%**。

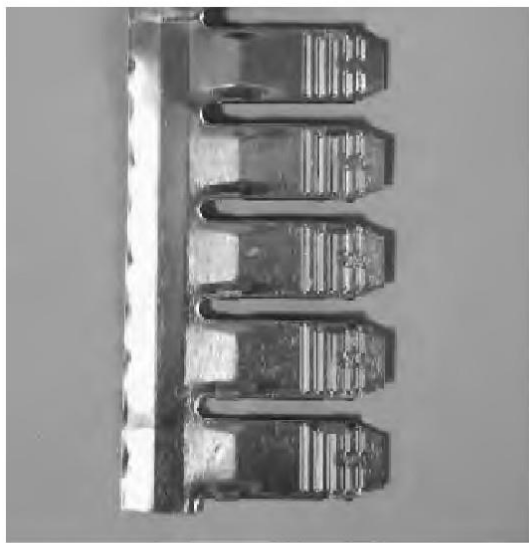


焓差室
布置图

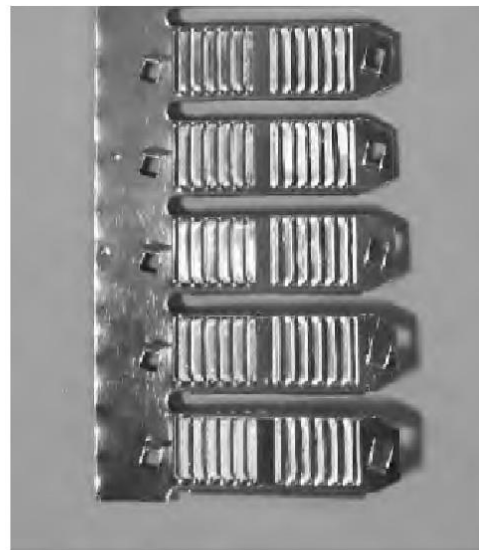
二、整体化与新型换热器

6、微通道换热器性能分析

位兴华等实验研究了三支路四流程和四支路四流程微通道换热器分别用于室内机时对热泵性能的影响，以及实验对比了全开窗及半开窗微通道室外机的性能，结果表明：三支路四流程全面优于四支路四流程，这是由于其分液更均匀，使其支路出口温度均匀性有所改善；全开窗微通道换热器的空气侧阻力更大，结霜速度快，制热能力衰减严重，而半开窗微通道换热器在结霜工况下的制热能力更好。



(a)半开窗



(b)全开窗

微通道换热器
室外机开窗
类型

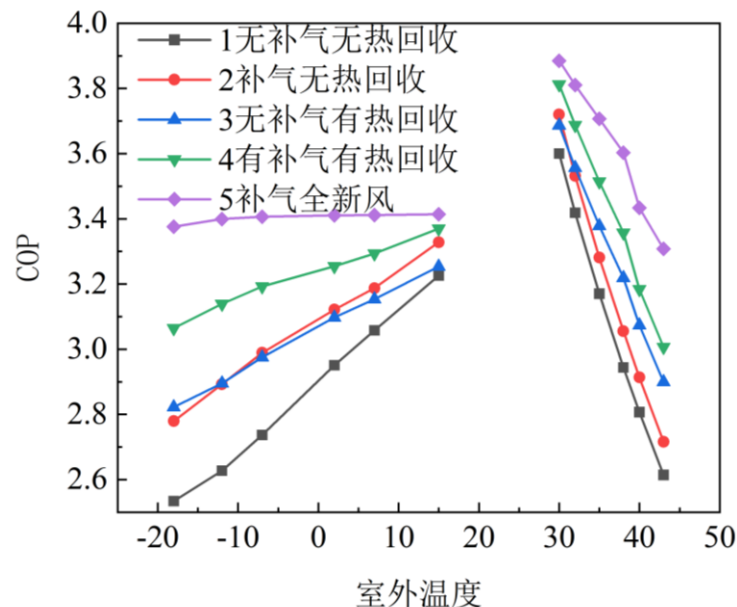
二、整体化与新型换热器

6、微通道换热器性能分析

Wu实验测试了带折叠微通道换热器的整体式R290空调器性能，实验结果表明，制冷工况下，补气可使COP提升3.4%~9.9%；全新风补气模式下，COP提升5.9%~33.6%。这表明全新风和补气对R290微通道空调器COP均有明显的提升效果，相比带补气的翅片管换热器系统，系统充注量下降了约30%，能效比基本持平。



折叠式微通道换热器实物图

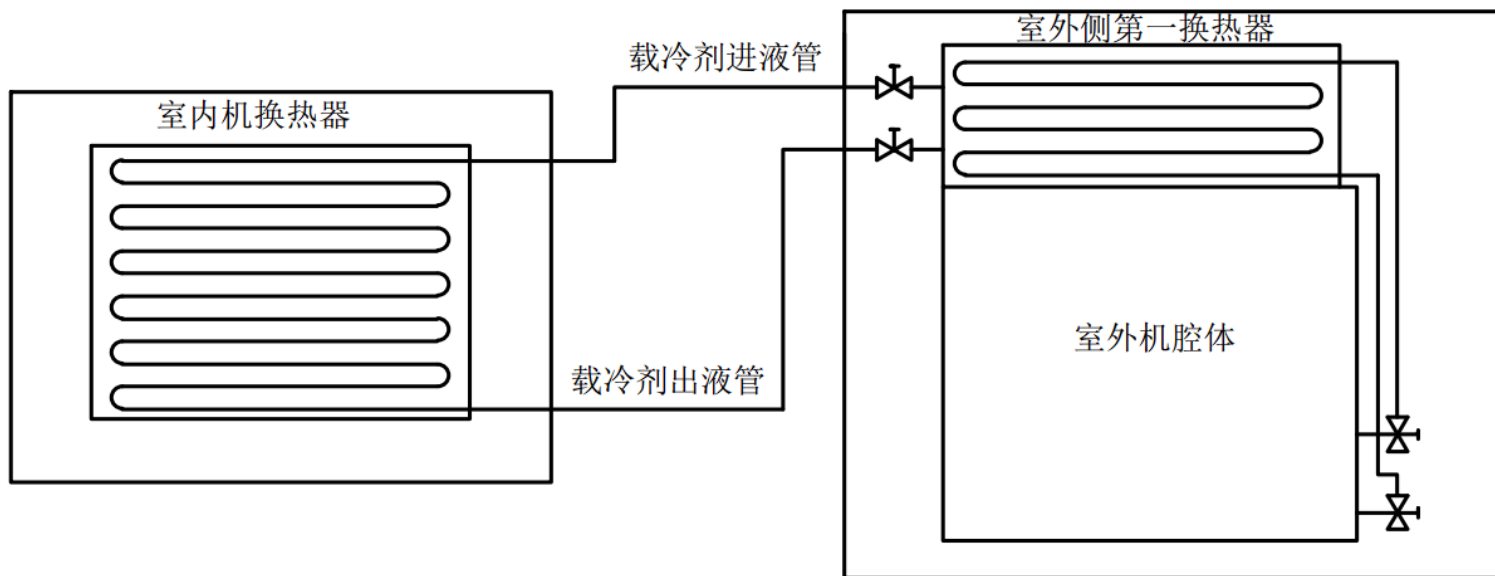


不同模式下系统COP的变化

三、水环路间接冷却

1、间接冷却系统介绍

间冷化：利用载热流体将冷/热量传递到室内，而可燃气体工质隔离在室外。载热流体主要是水、防冻液等载冷剂。这样可以避免可燃制冷剂泄漏到室内，或者即使发生泄漏也能快速地被气流稀释，避免达到燃爆浓度范围。



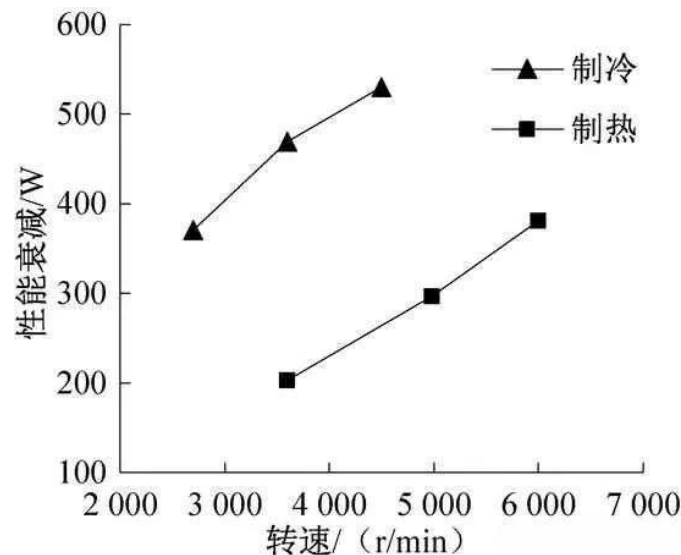
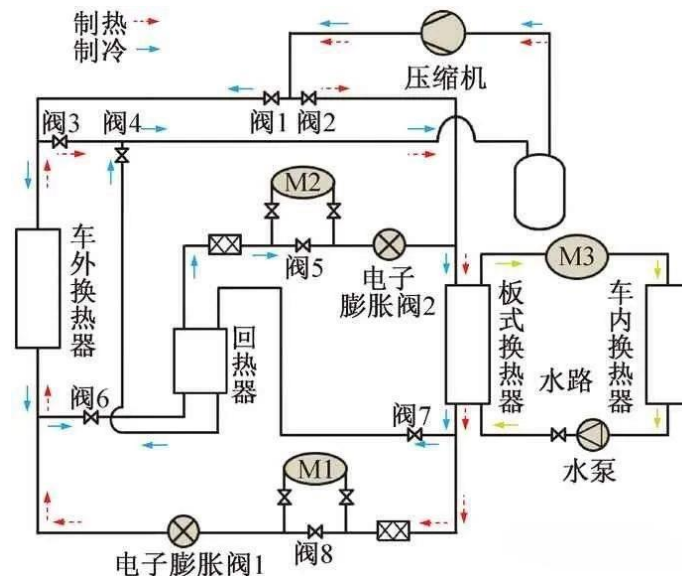
间冷式空调器系统示意图

三、水环路间接冷却

2、水环路间接冷却

- GOHDBANE利用仿真手段对采用二次回路和常规系统的制冷性能进行对比, 结果显示二次回路的制冷效率降低了20%以上
- 黄广燕等实验研究了带水环路的R290热泵空调制热性能, 结果表明与常规循环系统相比, 系统性能存在一定程度的**衰减**, 且同样随转速的提高而增大。

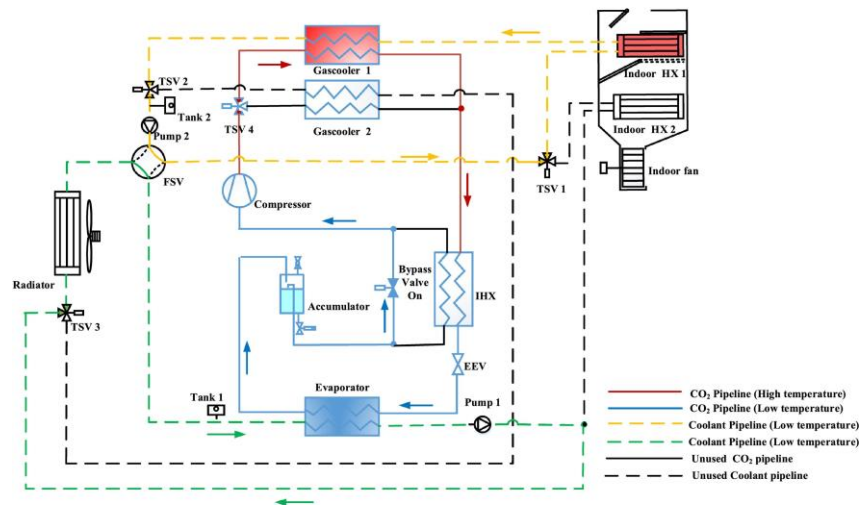
- 制热能力的衰减主要是由**板式换热器的**换热损失所造成, 可从以下方面对系统性能进行优化:
- **减少换热温差**
 - **水侧流量与制冷剂回路的优化匹配**



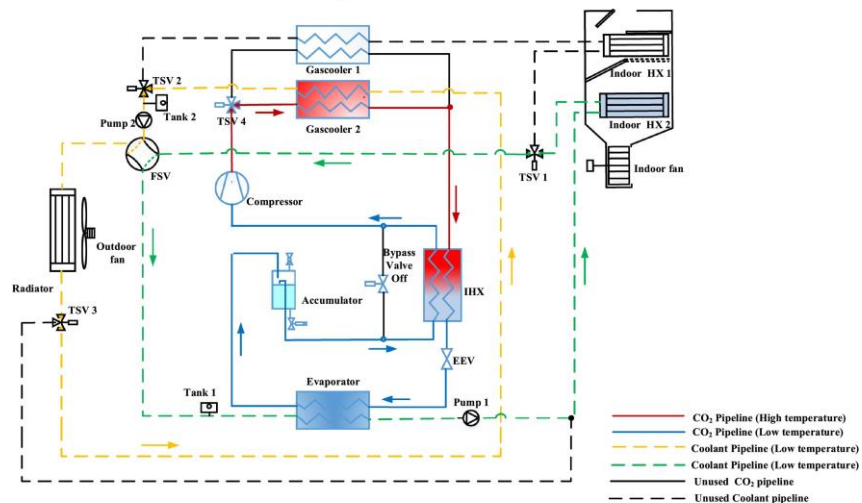
三、水环路间接冷却

2、水环路间接冷却

- 吴靖等实验研究了**空调箱风量**和**水侧流量**对水环路间接冷却热泵系统性能的影响，结果表明：增大空调箱风量能提高系统制热量及COP，但同时出风温度明显降低，而水流量由8L/min提高到15L/min制热性能提升不到1%。
- Wang等实验研究了跨临界CO₂二次回路热泵系统在不同工况下的性能，结果表明：**冷却液流量**、排气压力存在**最佳值**，可使系统COP最大，当冷却液流量增加时，最佳排气压力先迅速下降再保持不变，而最佳冷却液流量随环境温度降低和新风比增大而增加；制热模式下，气温由-20℃增长至0℃时，最佳冷却液流量由1.36L/min降至0.56L/min。



(a) Heating mode



(b) Cooling mode



三、水环路间接冷却

2、水环路间接冷却

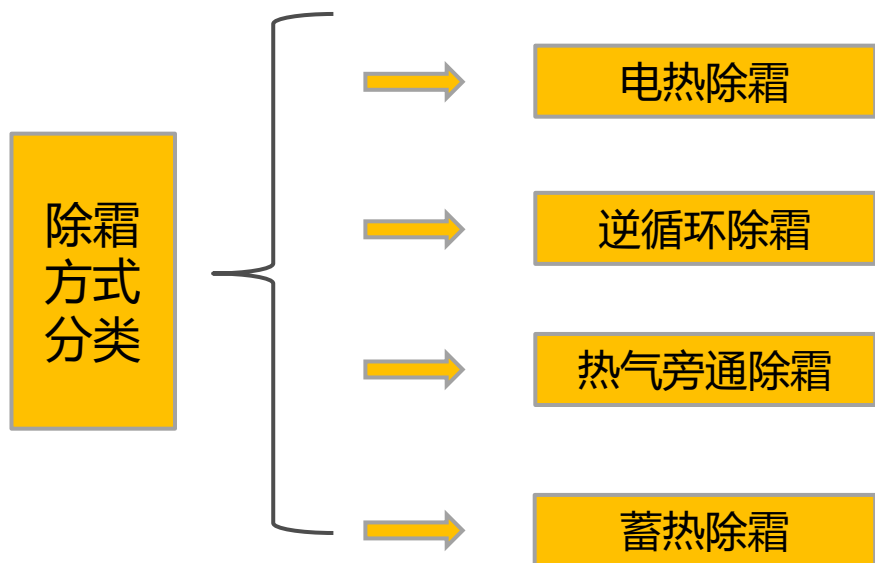
余热回收的引入可减少中间换热器的换热温差

- Zhang等实验研究了带**余热回收**的R152a二次回路热泵系统的制热性能，实验结果表明，相比常规热泵系统，二次回路热泵系统出现一定的性能衰减，并随着室内温度升高，衰减程度逐渐增加；但热回收系统的加入使其平均制热COP提高了9.29%，与常规热泵系统性能基本持平。R152a系统的能效提升对R290系统有一定的指导意义。
- Li等设计一种带余热回收的水环路间接冷却热泵系统，在环境温度 $-20^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内，评估了**余热回收率**、**环境温度**、**压缩机转速**、**水流量**和**风速**对系统性能的影响，结果表明：随环境温度的降低制热量急剧下降，压缩机转速的提高可以增加制热量，但降低了系统制热COP，二次回路中余热回收率和水流量的增加使系统制热性能有所提升。新系统的低温制热性能明显优于传统的直接系统，这主要是因为新系统中二次回路中的水温得到提高，板换两侧换热温差减小，使换热效果得到优化。



四、低温适应性研究

1、小型热泵系统除霜方式分类



目前常见的小型热泵除霜方式主要包括电热除霜、逆循环除霜、热气旁通除霜、蓄热除霜和不停机制热除霜等。

电加热除霜是在换热器表面添加电热元件，通过电加热达到融霜目的。由于部分热量散发到空气中，电加热除霜的除霜效率较低，仅为30%左右，且整机功耗会增加15%以上，导致电加热除霜并非最优选择。

四、低温适应性研究

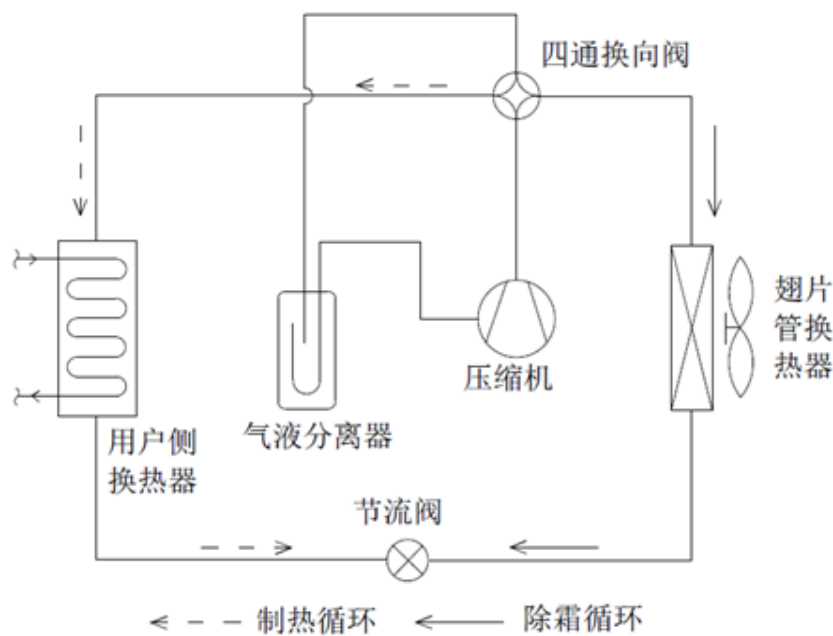
2、除霜方案简析

逆循环除霜即通过**四通阀换向**，将蒸发器和冷凝器的角色互换，利用压缩机排气对外机进行除霜

逆循环除霜的本质是制热循环和制冷循环的转换，蒸发器从室内空气吸收热量，其运行原理简单，但存在如下缺点：

- 室内**热舒适性差**
- 除霜再启动时间长
- **湿压缩**风险高
- 除霜能效低

逆循环除霜的效率可最达60%、低至40%。



逆循环除霜原理图

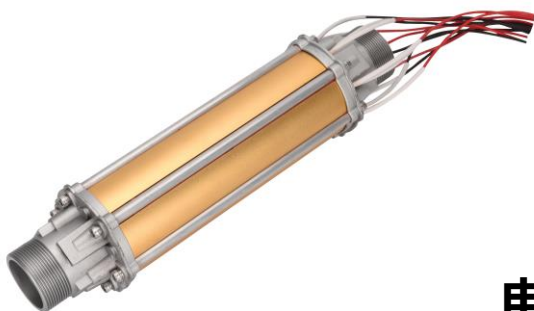
四、低温适应性研究

2、除霜方案简析

合理使用电加热器可有效提升除霜周期平均能力

XIONG等针对微通道热泵空调器系统，提出了一种**室内风机**和**电加热器**同时**开启**的除霜策略，实验结果表明：新型除霜策略的使用大幅缩短了除霜时长，使除霜效率提高了14.2%以上，周期平均制热量提高了11.3%，且由于室内盘管热量充足，直接避免了湿压缩现象的出现。

陈守海等研究了变频热泵空调器逆循环除霜过程中制冷剂分布规律，对除霜再启动制热慢的问题进行分析，发现制冷剂分布对除霜后快速升温有较大影响，再热前制冷剂的分布导致了较低的吸气压力，延缓了高压建立；再热时风扇延迟启动进一步延缓了制冷剂流动，在除霜和再热过程中开启**电加热器**可实现快速再热。

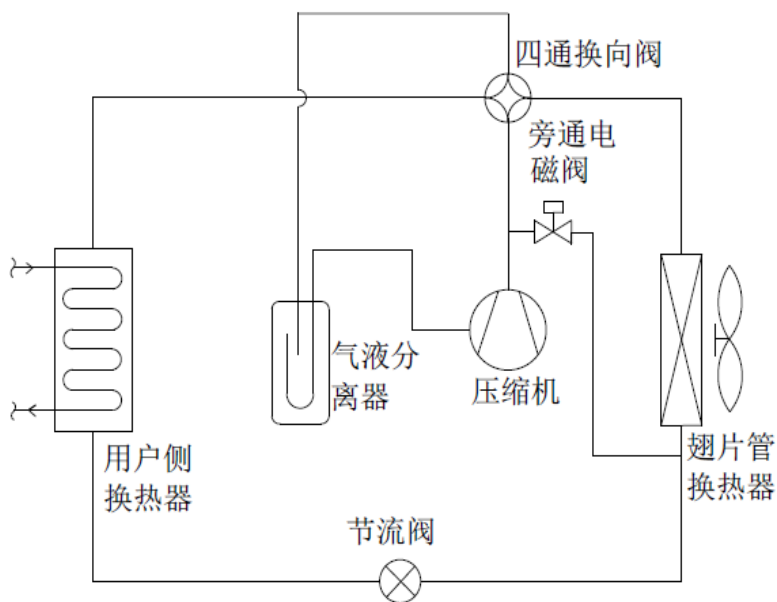


电加热器实物图

四、低温适应性研究

2、除霜方案简析

热气旁通除霜即从压缩机**排气口**引出**旁通回路**，使高温高压的热气经过旁通回路进入蒸发器进行除霜



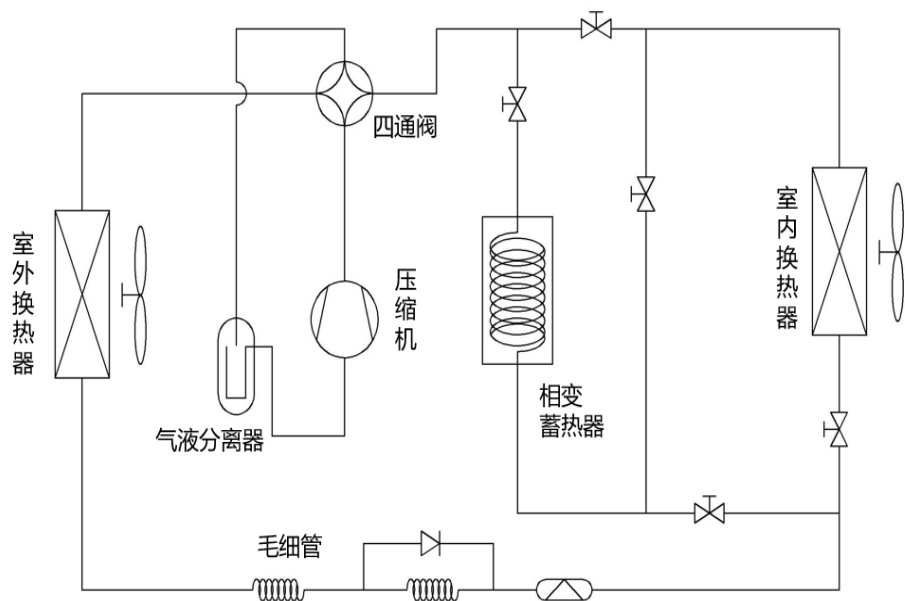
热气旁通除霜系统原理图

Ye等实验对比了热气旁通除霜和逆循环除霜的性能差异，结果表明：逆循环除霜的除霜时间较短且功耗低，但降低了室内热舒适性和除霜周期平均制热量；而热气旁通除霜的**除霜时间较长**，周期制热**COP较低**，但对系统整体运行造成的影响较小，且系统可以更快的恢复正常制热。针对上述问题，许多学者做了补充性研究。

四、低温适应性研究

2、除霜方案简析

蓄热器在正常制热过程中进行蓄热，在需要除霜时作为蒸发器向工质放热



蓄热除霜系统原理图

姬安生等以十二水磷酸氢二钠作为蓄热材料设计出蓄热除霜系统并进行实验测试，结果表明：相比逆循环除霜，蓄热除霜在低温及超低温周期制热量提升了8%~13%，除霜时长可缩短50%，除霜时出风温度较高，提升了室内热舒适性。

目前针对蓄热除霜的研究较少，良好的性能和热舒适性使其成为除霜方案的优选之一，但较高的成本和蓄热材料的不确定性也限制了其在家用空调中的使用。

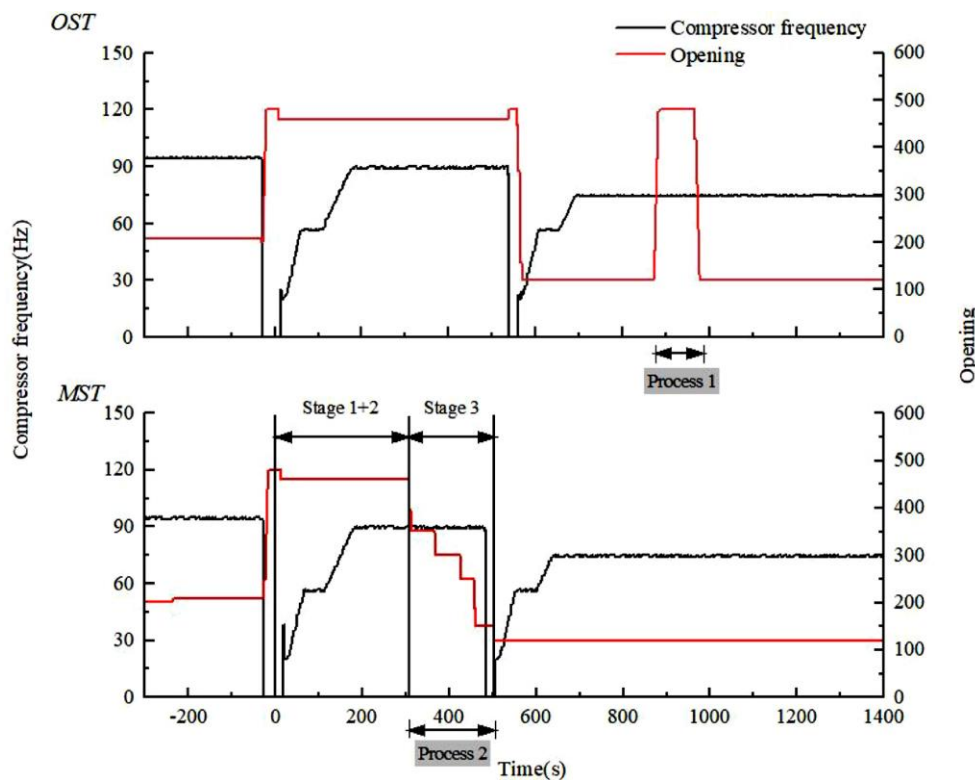
四、低温适应性研究

3、R290润滑油特性研究

为了消除油堵对热泵系统可靠性的影响，应从两方面入手

- 防止过多润滑油从压缩机排出，避免电子膨胀阀后润滑油分布过多。
- 防止过多工质溶解在压缩机油池中，避免将制冷剂储存在储液器中。

Du等针对R290热泵系统提出一种新型除霜控制策略(MST)，改变了膨胀阀开度和压缩机频率变化曲线，结果表明压缩机排出润滑油，相比原控制策略少10.55g，性能提高约1%，且有效消除油堵现象。



控制策略图



五、主要结论总结

以上分析了R290家用空调能效改进的相关途径及研究，分别从系统形式改变、新型换热器应用及性能改善等方面展开讨论，得出如下结论：

01

整体式空调应为R290应用的重要结构形式，结合**排风热回收**技术可在保证安全性的前提下显著改善系统能效；通过**流程优化**、**补气**等手段，使用**小管径**换热器和微通道换热器，可实现R290空调的**降本增效**。

02

间接冷却系统，是R290家用空调大型化最可行的结构形式；减少换热温差，对水、工质两回路进行优化匹配，以及复合余热回收功能，应是间接冷却系统高效化的关键所在。

03

由于R290**油溶解度**的特殊性，R290空调应在除霜过程中需要特殊措施来保证低温工况正常制热运行。



敬请批评指正！
感谢您的关注！

北京工业大学 马国远
R290家用空调能效改进途径解析
2024.4.8