

中国西部制冷空调技术研讨会 ——工业建筑设备节能专题研讨会



基于振荡融霜/回热核心技术

工业深度除湿与节能

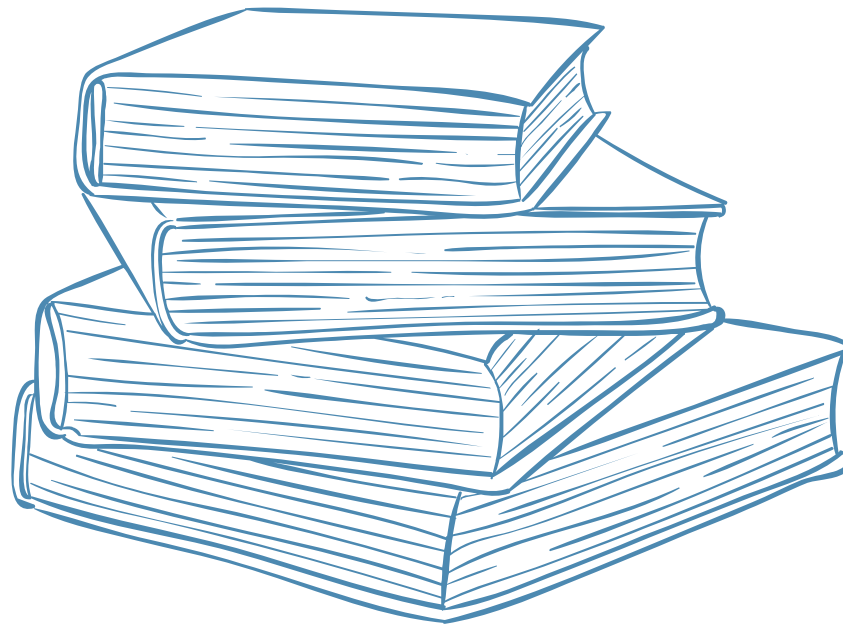
袁一军 教授

中国·上海

2021.4.8



- ◆ 常见除湿方法
- ◆ 冷冻除湿新的技术途径：固液态振荡融霜
- ◆ 特点对比及应用
- ◆ 振荡融霜的实现方式
- ◆ 压缩空气典型系统应用
- ◆ 高炉鼓风除湿
- ◆ 喷涂车间新风除湿系统
- ◆ 风冷热泵



一、常见除湿方法

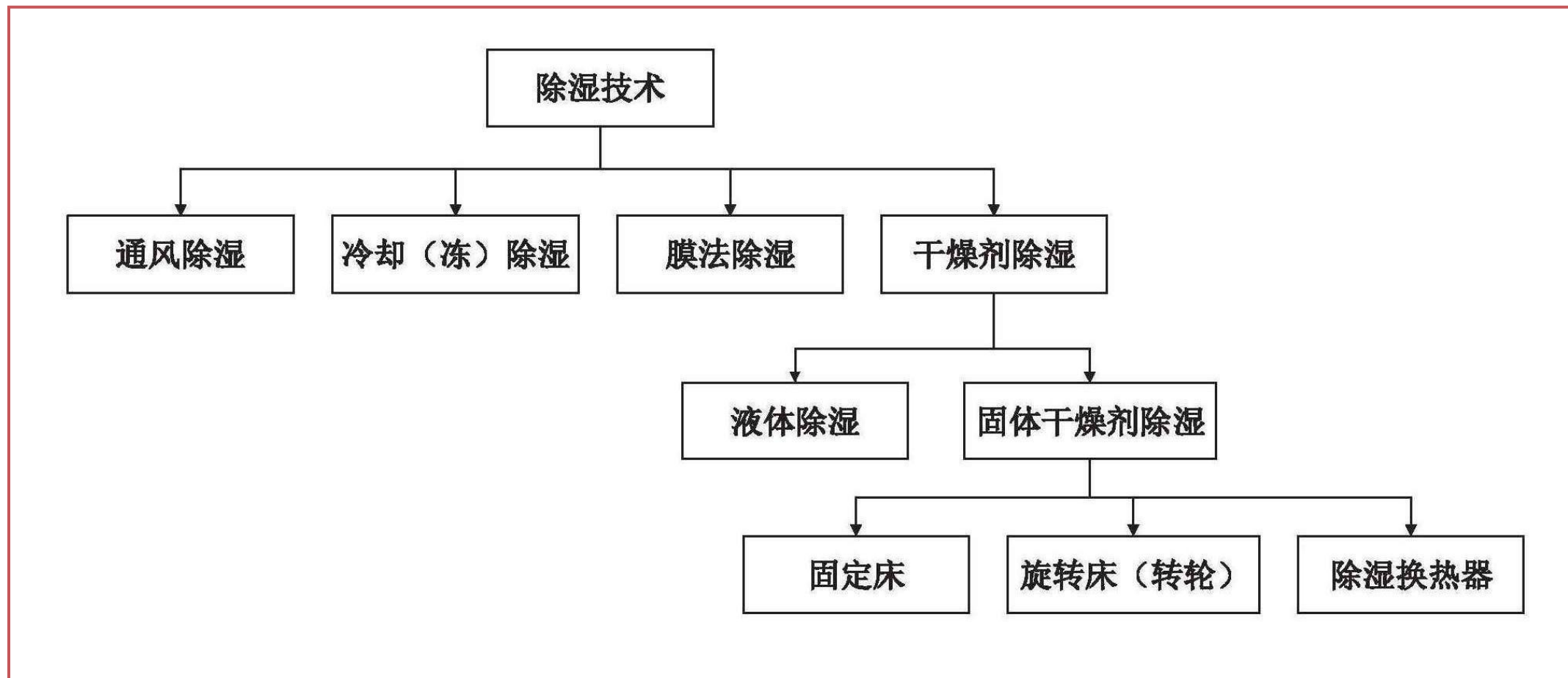




表5 除湿技术对比

方法	冷冻除湿	溶液除湿	转轮除湿
除湿原理	冷凝	吸收	吸附
设备占地面积	中	大	中
操作维修	中	难	中
除湿后	0 ~	0 ~	-30 ~
露点温度 (°C)	-20	-30	-50
核心设备	冷冻机 表冷器	吸收塔 换热器	除湿转轮 换热器

冷冻除湿一般用于高温高湿的环境且对湿度要求不是很严格，但在除湿量比较大且环境温度比较低，湿度和温度要求比较高的地方，采用冷冻除湿就很难达到所控制的湿度要求。

转轮除湿再生能耗大，热损失大，系统复杂。



表6 工艺性除湿要求

相关领域	含湿量 (g/kg干空气)	露点 (°C)	目的
档案母片库	5.46	5	保证存储环境
胶囊干燥车间	2.57 ~ 5.61	-4.1 ~ 5.4	产品生产
啤酒、蔬果、蛋类储藏	1.84 ~ 2.38	-8 ~ -5	保证存储环境
锂电池生产车间	0.007 ~ 0.230	-60 ~ -30	产品生产
聚酯切工艺	0.003	-65 ~ -30	产品生产
低温制冷工业	0.002	-70	防止低温室结霜
电子工业生产	0.002	-70	产品生产

-铃木谦一郎，大矢信男． 除湿设计 [M]． 北京：北京建筑工业出版社，1980．
-范俊宁． 档案馆母片库低温低湿环境的实现 [J]． 制冷与空调(四川) ，2010，24(4) ： 81—82，100．
-郭雨谷． 转轮除湿技术在软胶囊制剂净化厂房设计中的探讨 [J]． 化工与医药工程，2016，37(3) ： 32— 37．



表7 设备用气湿度要求

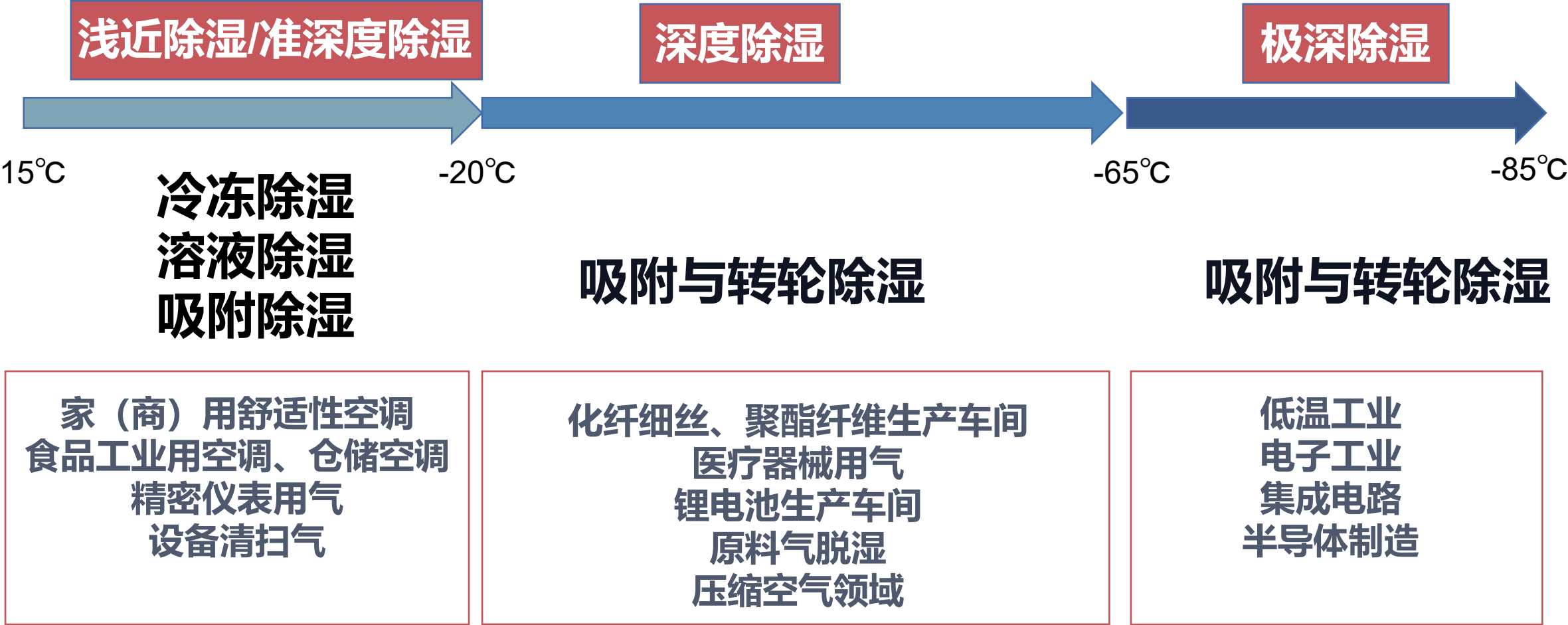
相关领域	含湿量 (g/kg干空气)	露点 (°C)
精密部件清扫气	0.815	-17
高精喷涂用气	0.815	-17
医疗器械动力用气	0.038 ~ 0.614	-46 ~ -20
臭氧发生装置	0.007	-60
粉体传输用气	0.007	-72

表8 原料气湿度要求

相关领域	含湿量 (g/kg干空气)	露点 (°C)
二氧化碳脱水	0.0719	-40
氧气脱水	0.0061	-60
氢气脱水	0.0028	-65
乙烯脱水	0.0028 以下	-65 以下
氩气脱水	0.0015	-70

-陈秉焕, 钟俊亮, 洪清展, 等. 吸附法是医用空气去除水分的惟一选择吗? [J]. 医用气体工程, 2017, 2(3) :9—13.
-铃木谦一郎, 大矢信男. 除湿设计 [M]. 北京: 北京建筑工业出版社, 1980.
-《气动工程手册》编委会. 气动工程手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

除湿等级划分



-郭涛. 洁净手术室新风深度除湿与变新风量系统节能设计探讨 [J]. 工程建设与设计, 2013(2) : 123— 126.

-苏博生, 韩巍. 低温余热/电联合驱动的双级溶液除湿系统热力性能研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37 (11) : 2296 — 2302.

-郑宝军, 殷勇高, 张小松. 压缩空气溶液深度除湿干燥方法及实验验证 [J]. 化工学报, 2014, 65(增刊 2) : 52 —57.

-袁艳, 欧阳惕, 林创辉, 等. 热回收型转轮复合型除湿系统的实验研究 [J]. 制冷, 2013, 32(2) : 5—9.

除湿等级划分



舒适性除湿，目前已采用统一的 ASH RAE 舒适标准
深度除湿，至今没有一个统一的标准

露点标准

除湿后露点温度 (°C)	标准
> - 20	浅近除湿/准深度除湿
- 65 ~ - 20	深度除湿
< -65	极深除湿

含湿量标准

方法	含湿量 (g/kg)
溶液除湿	< 5
转轮除湿	< 6

-Guan Bowen, Liu Xiaohua, Zhang Tao. On the importance of air-solution flow rate matching in liquid-desiccant deep-dehumidification system. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. 164. 120614
-Guan Bowen, Zhang Tao, Liu Xiaohua. On-site performance investigation of a desiccant wheel deep-dehumidification system applied in lithium battery manufacturing plant. Energy and Buildings. 2021. 232. 110659

1. 舒适性空调的环境露点要求通常约为 14°C ，原料气脱湿、低温等领域的露点则要求低至 -65°C 及以下，而工业生产以及设备用气的露点要求范围较为广泛，可从 5°C 低至 -70°C 。
2. 冷冻除湿方面，直接蒸发制冷以及加压冷冻除湿可使出风露点降至 $-20\sim-10^{\circ}\text{C}$ 以下。
3. 溶液除湿方面，可通过对除湿液进行冷却或对湿空气进行压缩等方式使出风露点达到 $-20\sim-10^{\circ}\text{C}$ 甚至更低。
4. 冷冻除湿、溶液除湿方法可满足较低的除湿要求。
5. 使用常规冷冻除湿、溶液除湿无法将空气的露点降低到原料气除湿、锂电池制造等的露点要求，一般会采取特定吸附材质的转轮除湿技术。

溶液除湿:

- 可利用低品位能源（如冷凝热、工业废热）或可再生能源（如太阳能、地热能）
- 溶液除湿机组长期使用可能会出现溶液渗漏或逸出，产生腐蚀问题
- 存在润湿性不足、热容低、液滴越流等问题
- 目前一些节能的溶液除湿研究大多还处于可行性研究阶段

转轮除湿:

- 固体干燥剂转轮除湿系统的再生过程通常通过天然气的燃烧驱动，再生能耗高
- 存在除湿床吸附量低、热量和组分传递系数小、循环再生周期长、吸附剂更换等问题
- 目前一些节能的吸干机，如余热再生等，系统过于复杂

传统的冷冻除湿

- 不能满足低露点除湿要求
- 当蒸发温度低于露点温度时，带水问题突出，导致热交换器管表面或空气管道上的霉菌生长
- 但冷凝是最常用的方法，在大多数实际工况中应用普遍

二、冷冻除湿新的技术途径：固液态振荡除湿



- ❖ 目前的除湿技术包括，液体（溶液）除湿，和固体除湿（LIOL转轮），冷冻除湿。
- ❖ 冷冻除湿包括结霜和不结霜，不结霜除湿实际上相当于液体溶液除湿，水可以理解为极稀的溶液，冷水喷淋除湿就相当于极稀的溶液的喷淋，翅片管除湿也是通过翅片表面的水膜实现。
- ❖ 结霜除湿，冰相当于极稀的固体盐。
- ❖ 不论是液体溶液除湿，还是固体除湿，其再生需要将水转换为气态，需要引入热量，使得除湿和再生过程变为分离的过程。

核心技术：固液态振荡融霜

基于水的三态相变的固液态振荡冷冻除湿技术



- ❖ 基于水的三态相变的固液态振荡除湿技术，固体除湿是气态水变为固态冰结霜除湿，气态水变为液态水为液态除湿，液态除湿产生的热量又能使固态的霜变为水实现再生，这样就形成了固态结霜除湿，液态融霜除湿，除湿再生合为一体的无缝过程。
- ❖ 固态结霜除湿和液态融霜除湿的振荡通过风流的方向的变换实现。
- ❖ 所谓的振荡意味着固态结霜除湿和液态融霜除湿是快速高频地实现，即结霜并未在换热器表面完全形成霜层，也不会对传热产生影响，而常规的融霜方法等到霜层很厚才进行，严重影响传热。

核心技术：固液态振荡融霜

基于水的三态相变的固液态振荡冷冻除湿技术



- ❖ 快速振荡之所以能实现，是因为融霜和结霜振荡并不影响除湿，而常规的融霜方法需要中断除湿，且有能量损耗，所以不能频繁。
- ❖ 风流方向的振荡切换，也意味着固态除湿总是在除湿的后面，而液态除湿在前面，从而保证除湿过程的彻底，而不会有携带液态水的问题。

核心技术：固液态振荡融霜

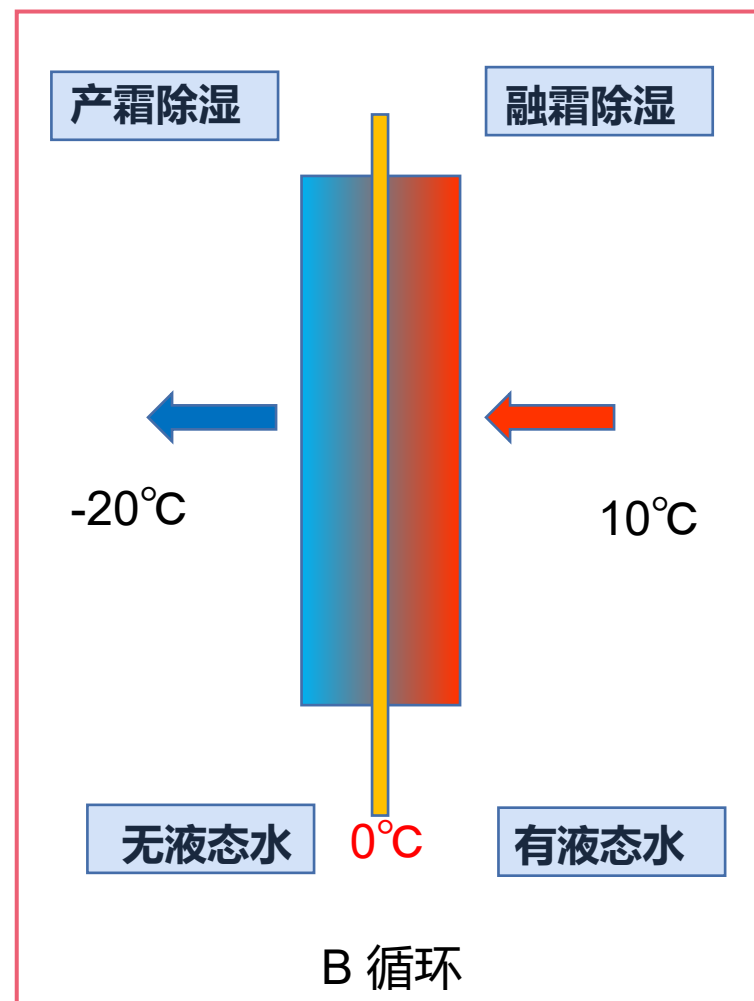
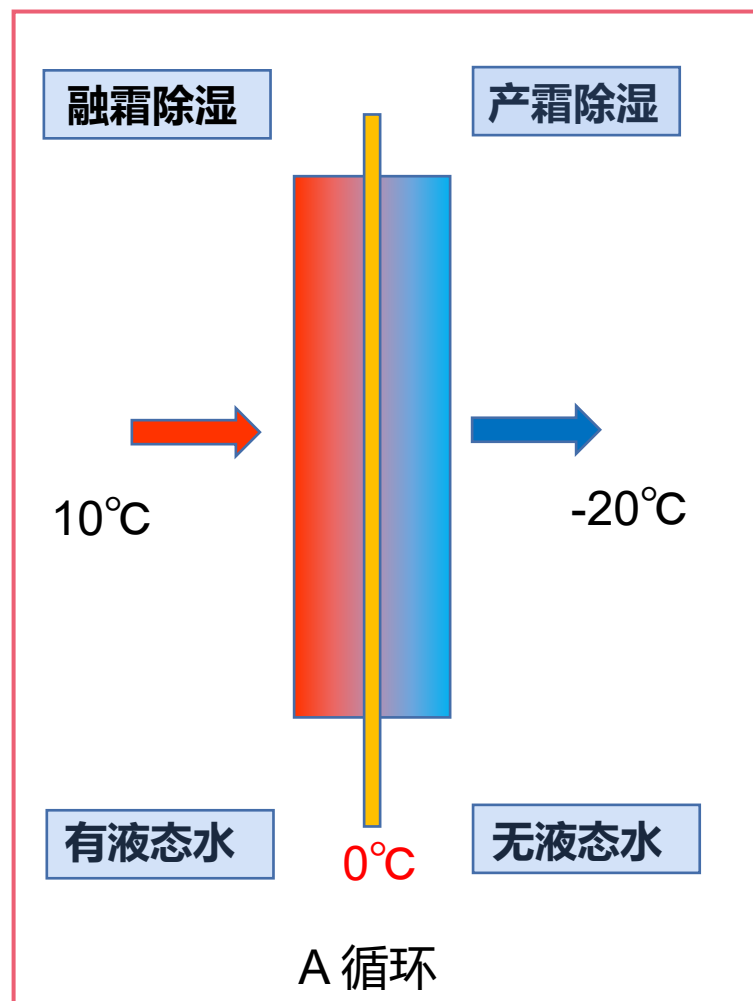
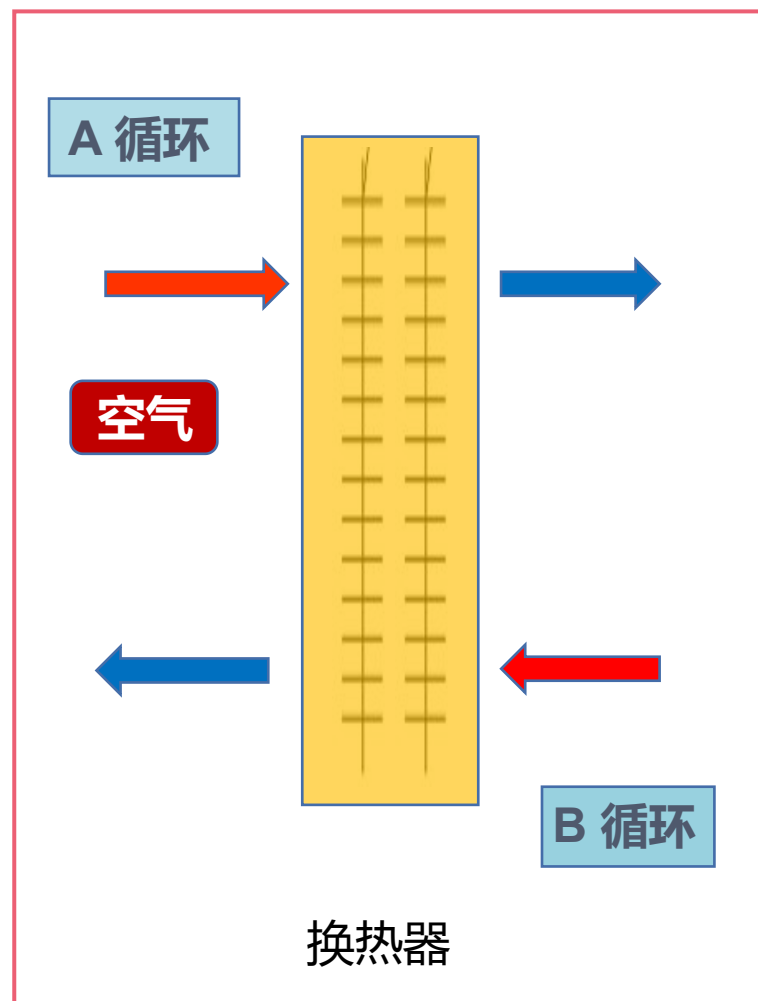
基于水的三态相变的固液态振荡冷冻除湿技术



- ❖ 通过空气从左到右（A循环），和从右到左（B循环）的交替实现风流振荡除湿，空气交替在换热器的左右两部分进行产霜除湿和融霜除湿，使得空气除湿连续不间断地运行。
- ❖ 融霜除湿时，融霜需要的热量来自除湿产生的冷凝热，除湿需要的冷量来自霜的融化。
- ❖ 当环境空气较低时，可自动切换到利用制冷膨胀阀前热气的过冷实现融霜，同时增大制冷系统的制冷量。
- ❖ 其原理如下图所示。

核心技术：固液态振荡融霜

基于水的三态相变的固液态振荡冷冻除湿技术



核心技术：固液态震荡融霜

基于水的三态相变的固液态振荡冷冻除湿技术



特点

低温低湿：无常规冷干机和除湿机的温度限制（空气温度大于 2°C ）和除湿干燥过程的无霜限制。空气温度远远低于 0°C ，可低至 -35°C 。

无液低湿：由于空气处理出口侧为固态霜，无液态水，不存在常规的除湿机，冷干机空气中带液态水的问题，保证低湿度，且无需常规冷干机配套的气水分离器。

空气净化及自清洗功能：除湿过程同时吸收空气中的粉尘等，并通过结霜融霜过程自己清洗

全工况运行：即使环境温度很低，如低于 0°C ，系统仍然正常运行。

三、特点对比及应用



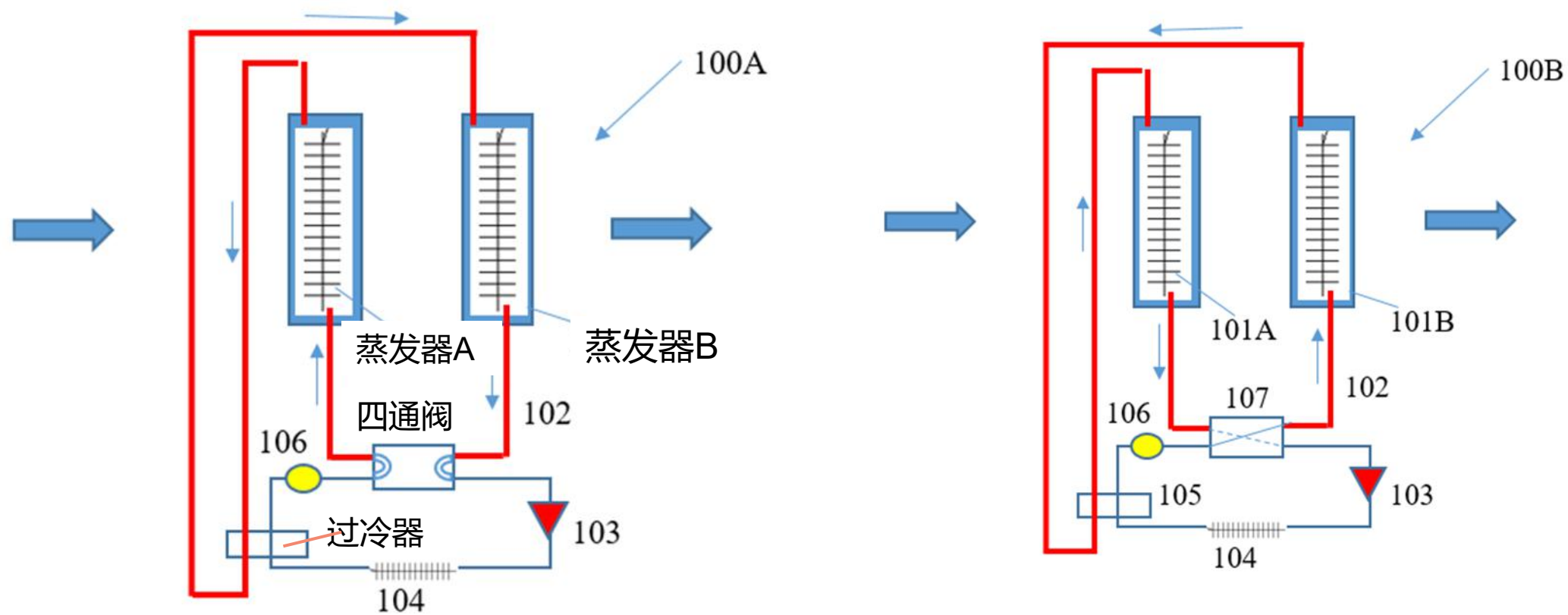
- ❖ 溶液除湿/固体除湿/振荡除湿：再生型除湿
 - ❖ 溶液除湿/固体除湿：热驱动型除湿
 - ❖ 振荡除湿：冷驱动型/电驱动型除湿
 - ❖ 溶液除湿：利用低品位热源
 - ❖ 固体除湿：露点可以极低，需要高品位热源
 - ❖ 振荡除湿：露点范围宽，露点可以低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，无需外界热源
-
- ❖ 振荡除湿可以替代大部分的溶液除湿和固体除湿。
 - ❖ 溶液除湿在有低品位热源的情况下可以作为振荡除湿的预除湿
 - ❖ 在露点要求很低的情况下固体除湿可以作为振荡除湿的后部的更深度的除湿联合除湿，振荡除湿极大的减少固体除湿负荷。



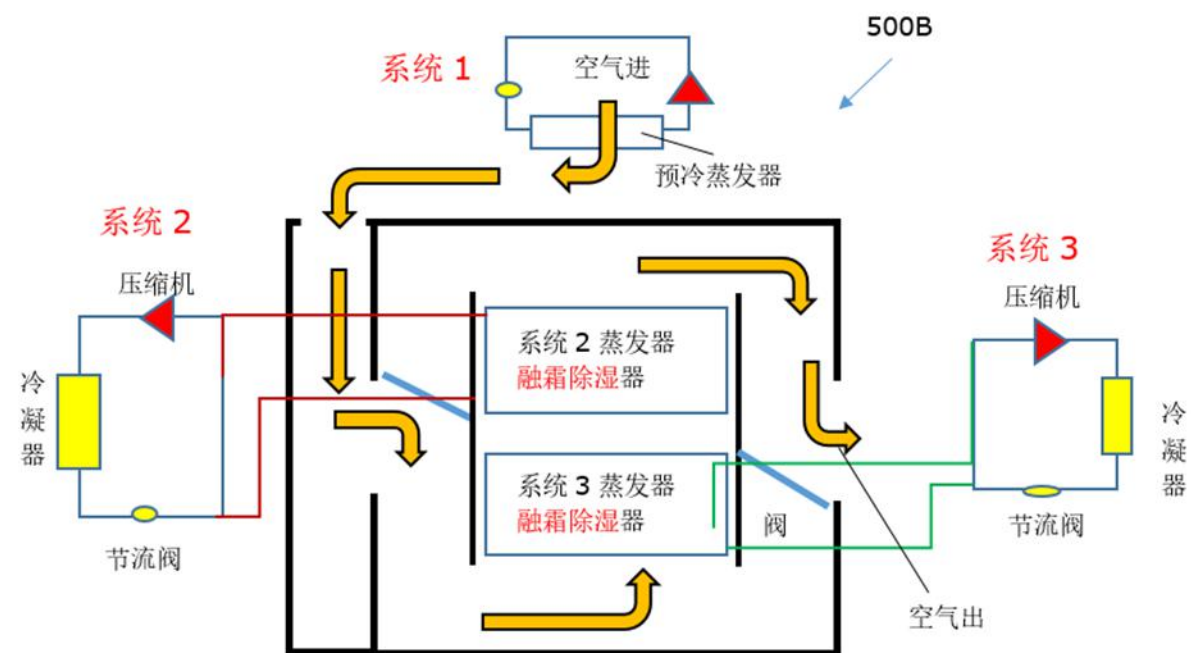
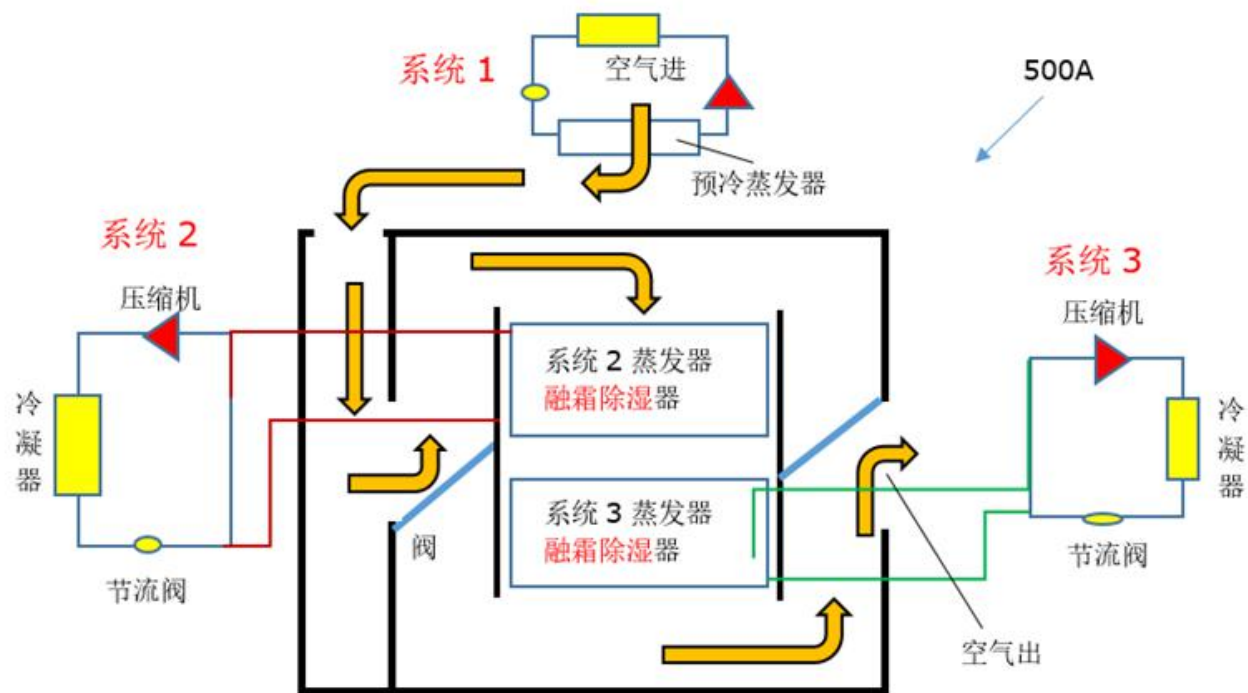
四、振荡融霜实现方式

- ❖ 通过被除湿的气体，冷媒或者载冷剂流程的变换及其组合使得换热器表面的温度交替的高于 0°C 或低于 $^{\circ}\text{C}$ 实现产霜和融霜的循环。
- ❖ 具体方式有多种
- ❖ 被除湿气体的换向
- ❖ 被除湿气体的切换
- ❖ 载冷剂的换向
- ❖ 载冷剂切换
- ❖ 冷媒换向
- ❖ 冷媒切换

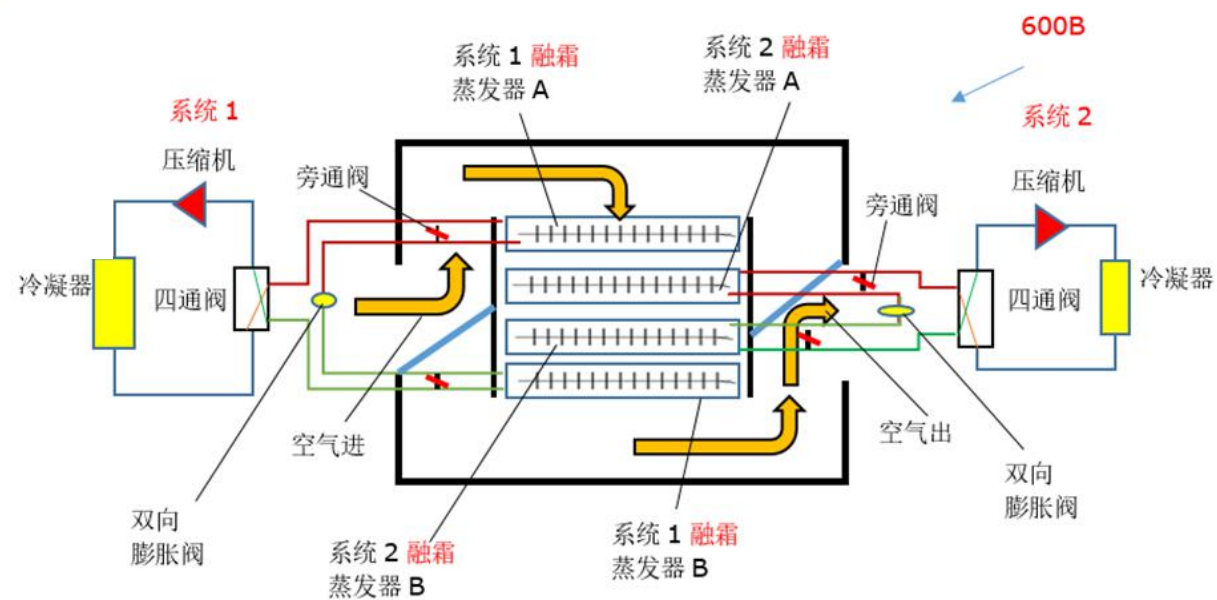
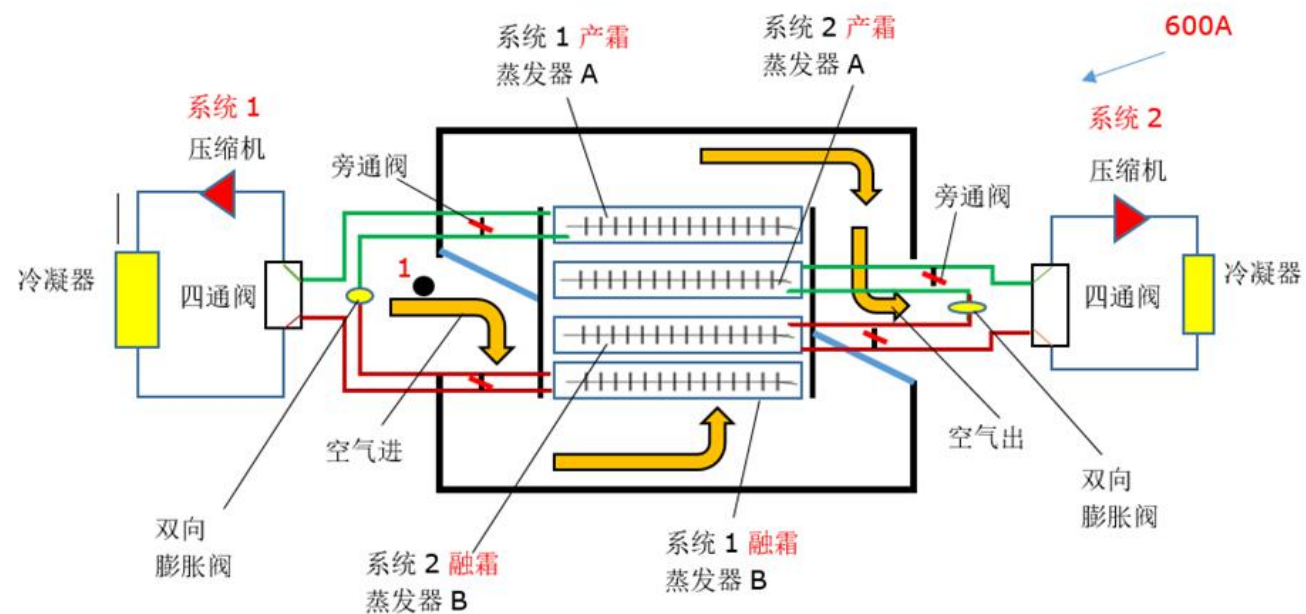
冷媒换向



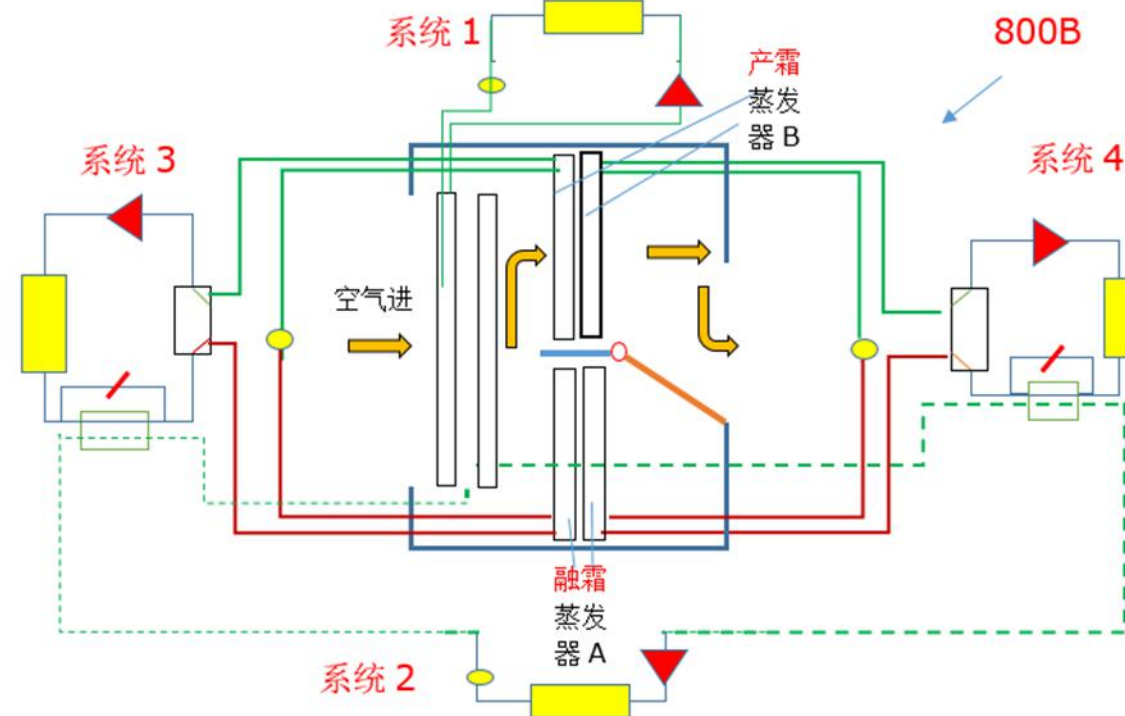
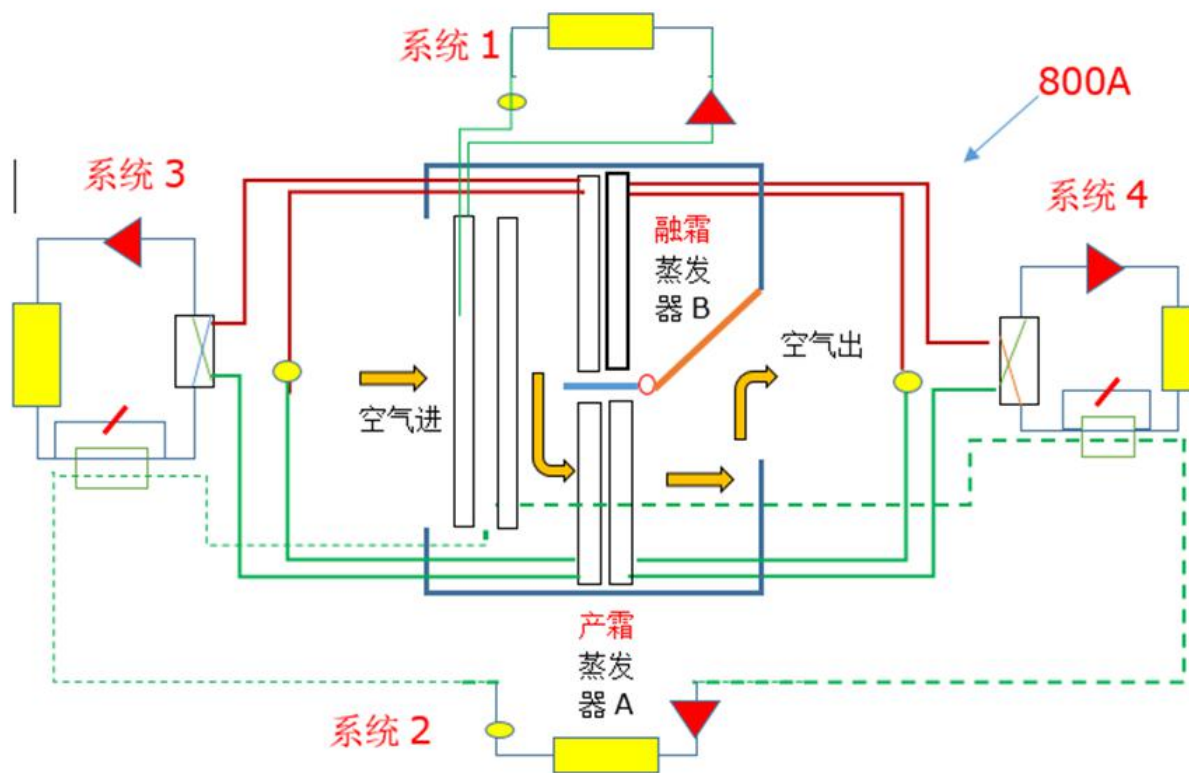
气体换向



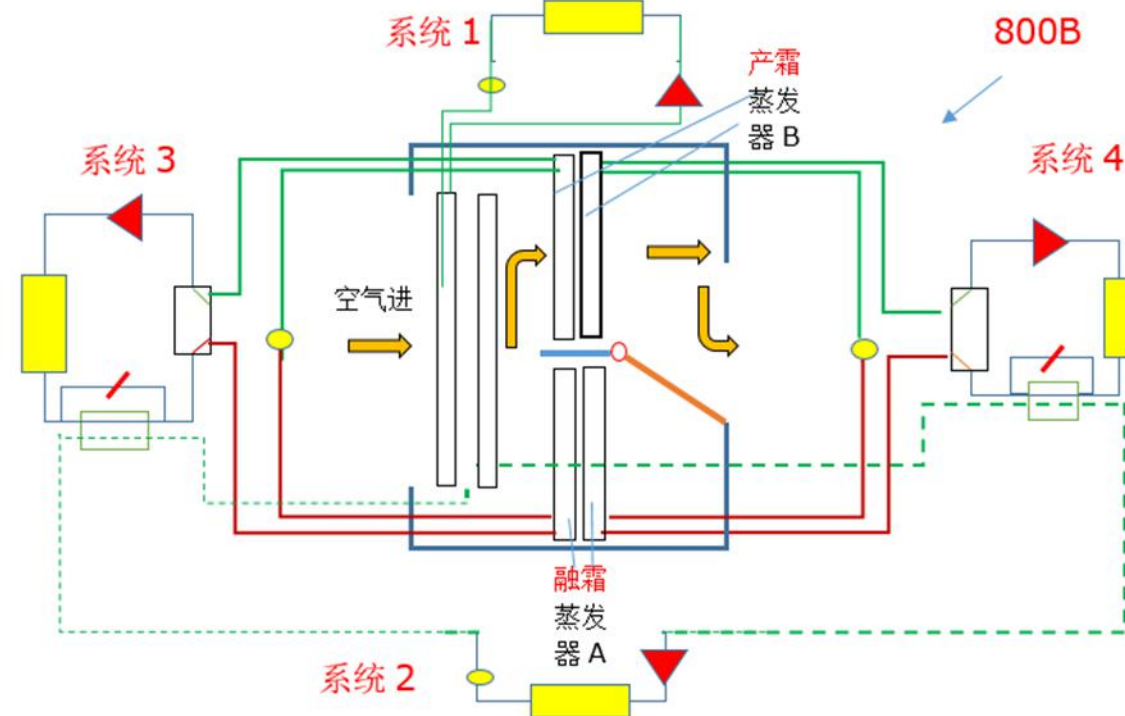
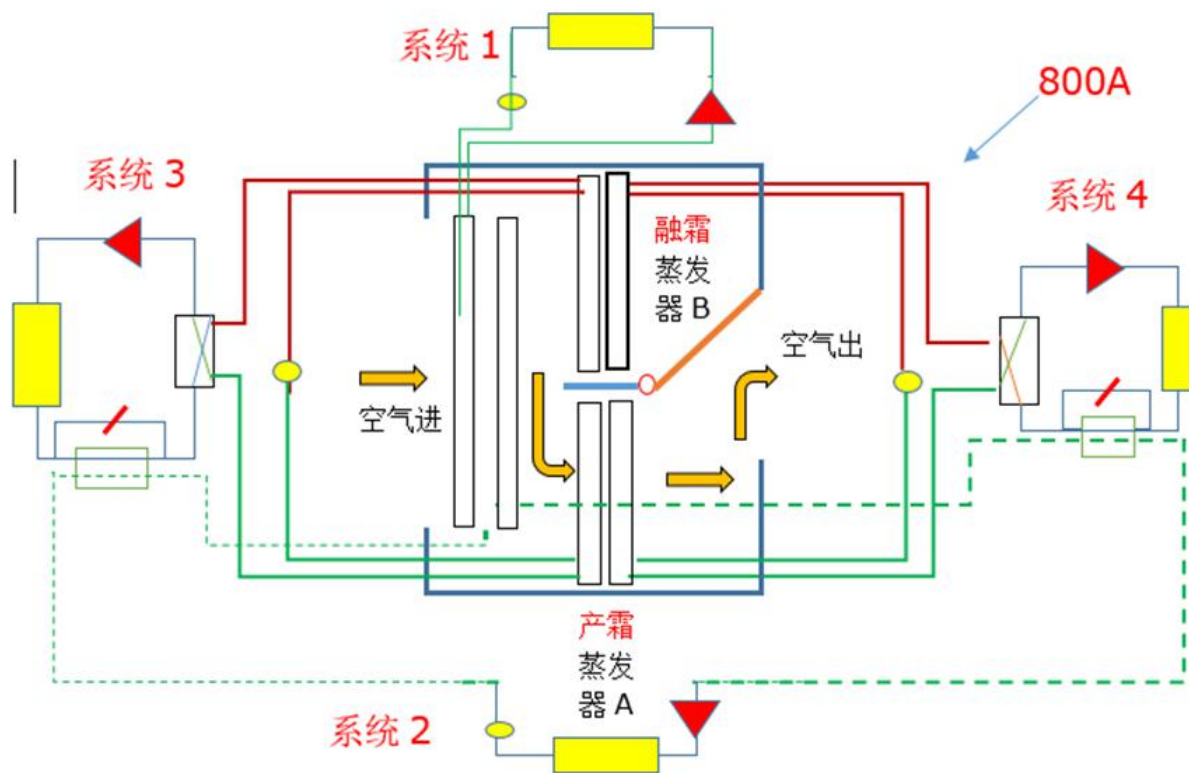
气体/冷媒均换向



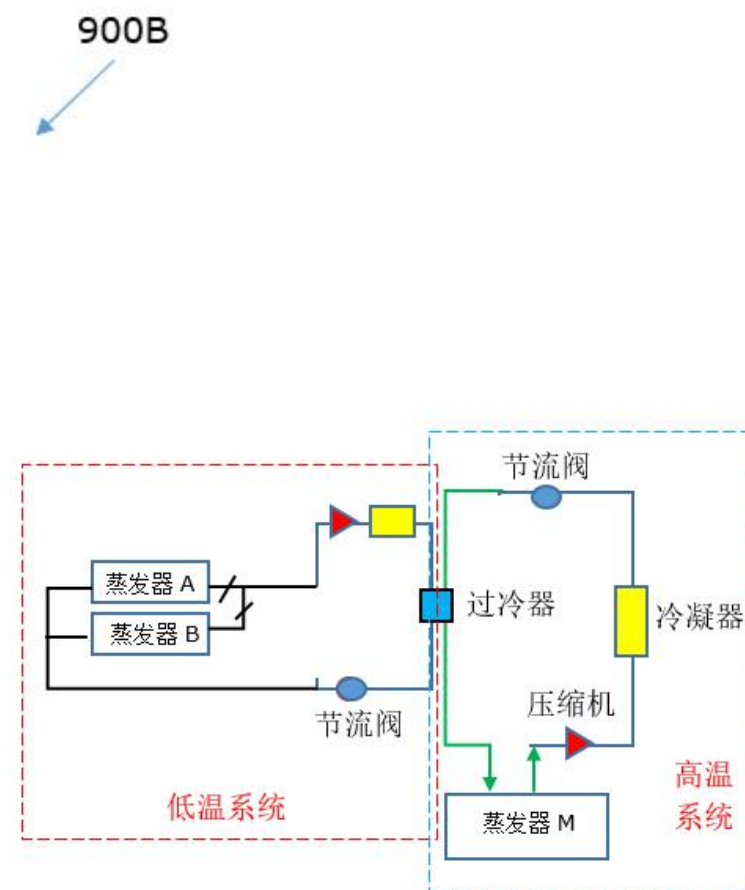
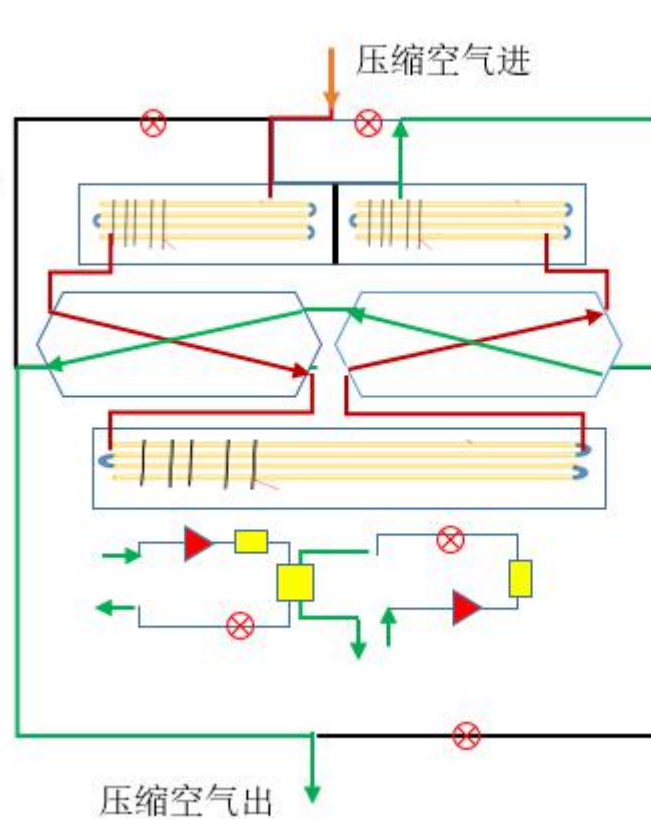
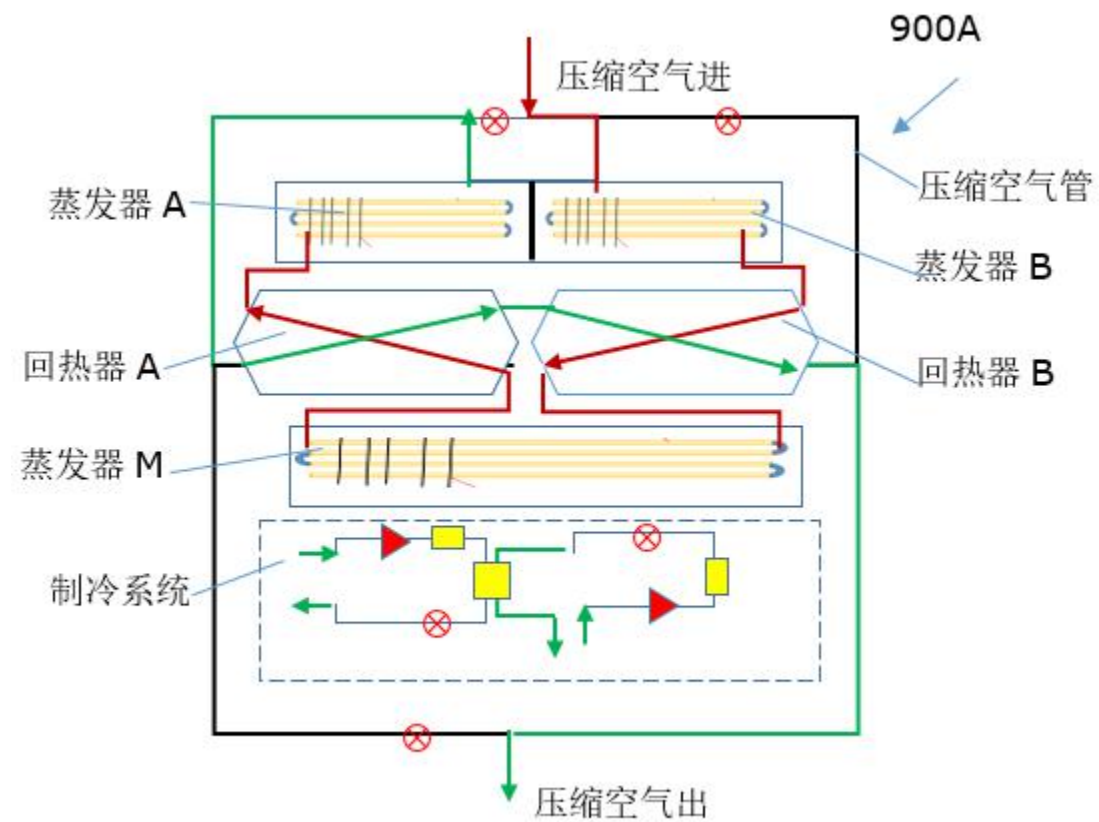
气体切换/冷媒换向



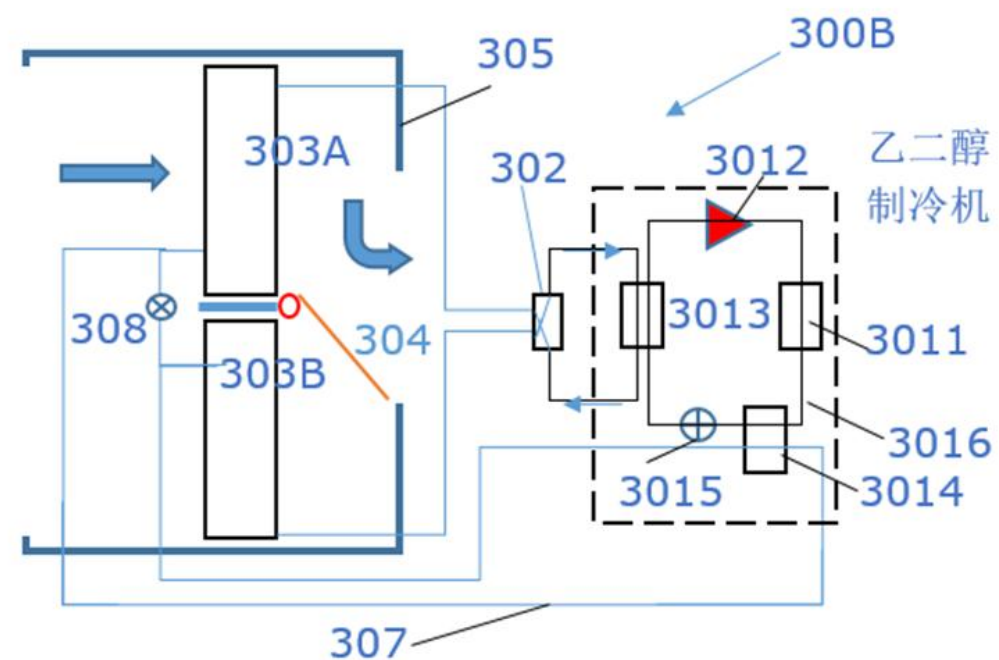
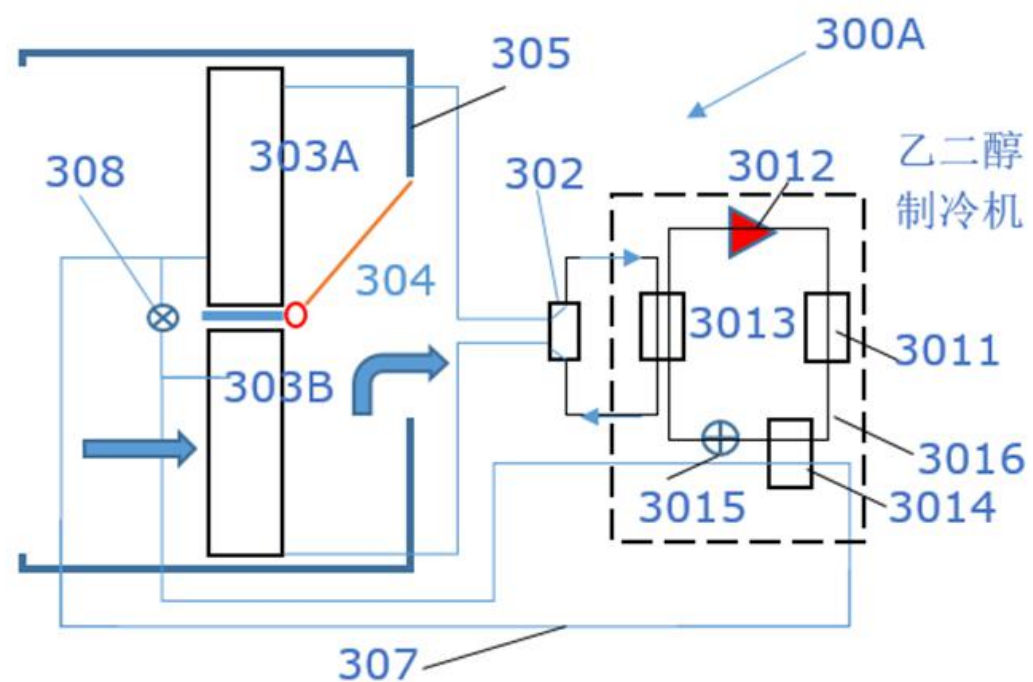
气体切换/冷媒换向



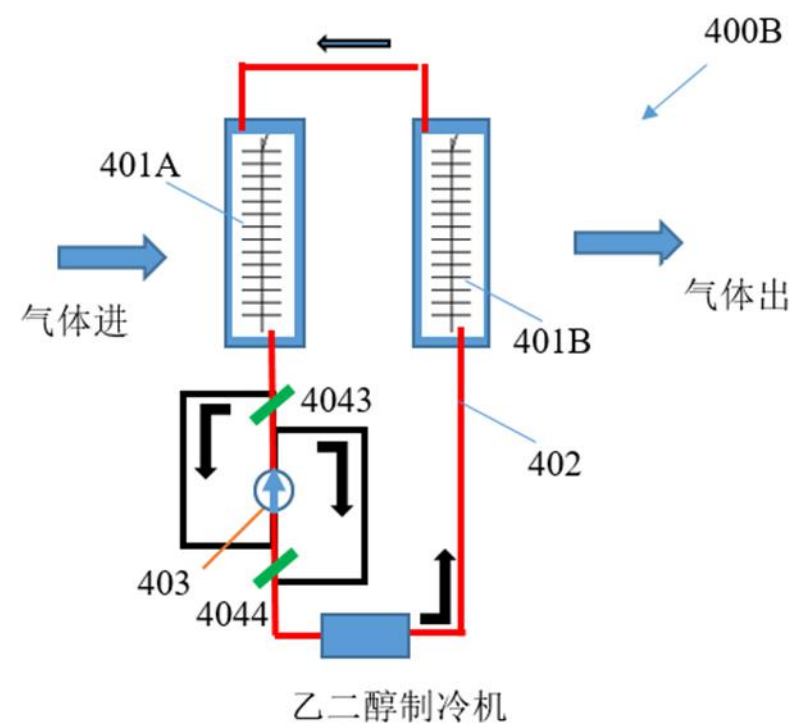
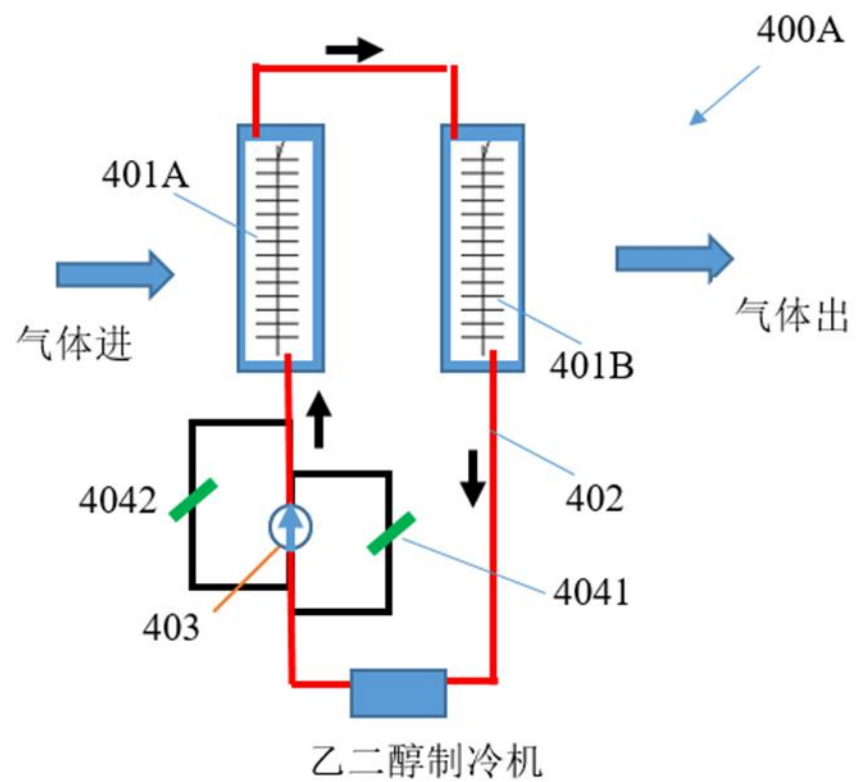
气体换向/冷媒切换



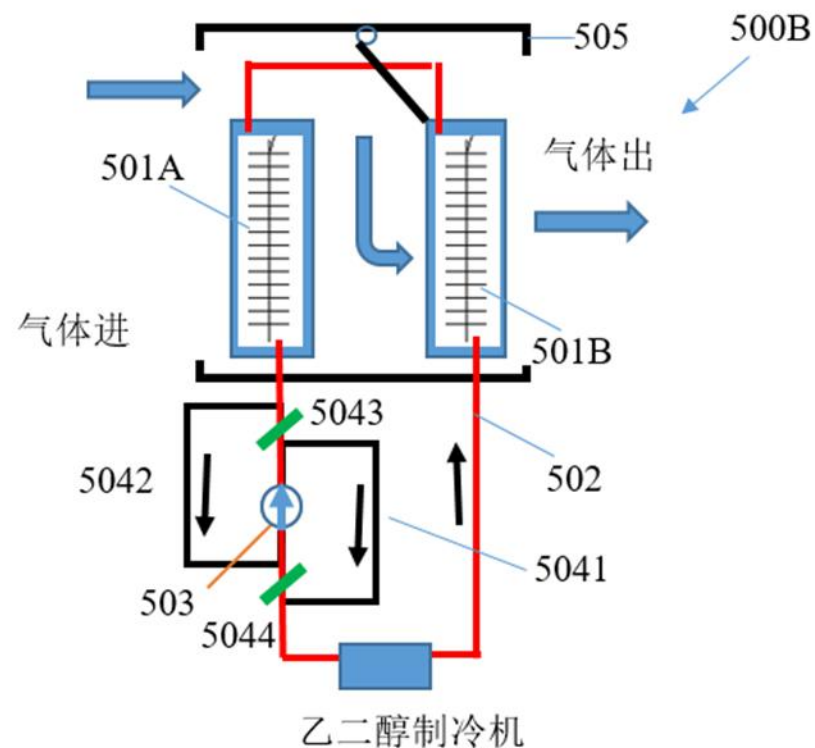
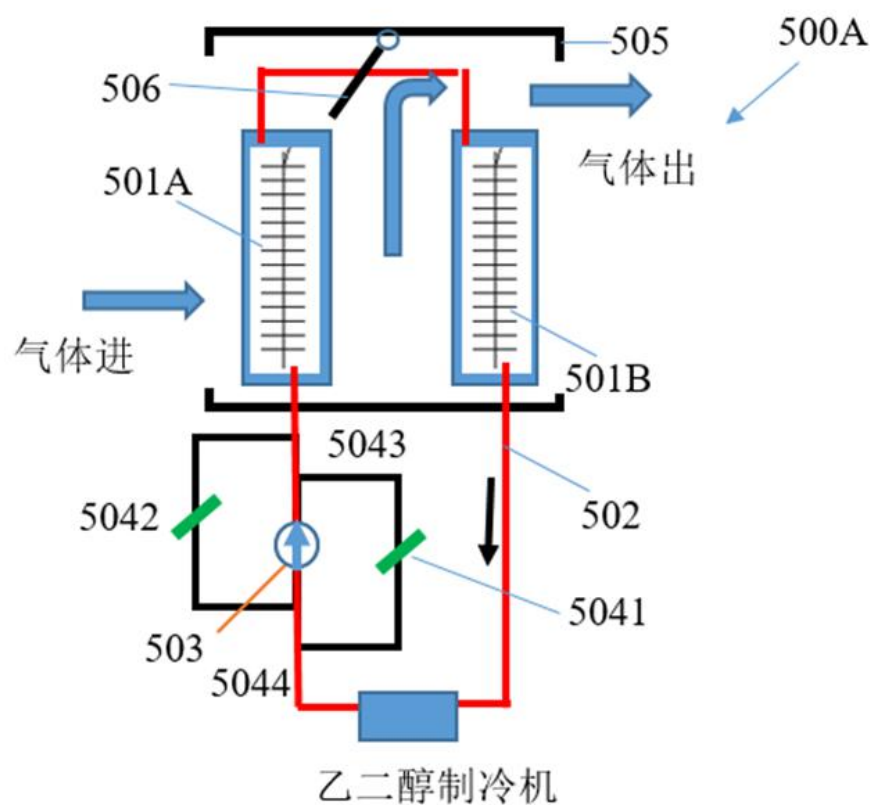
气体切换/载冷剂换向



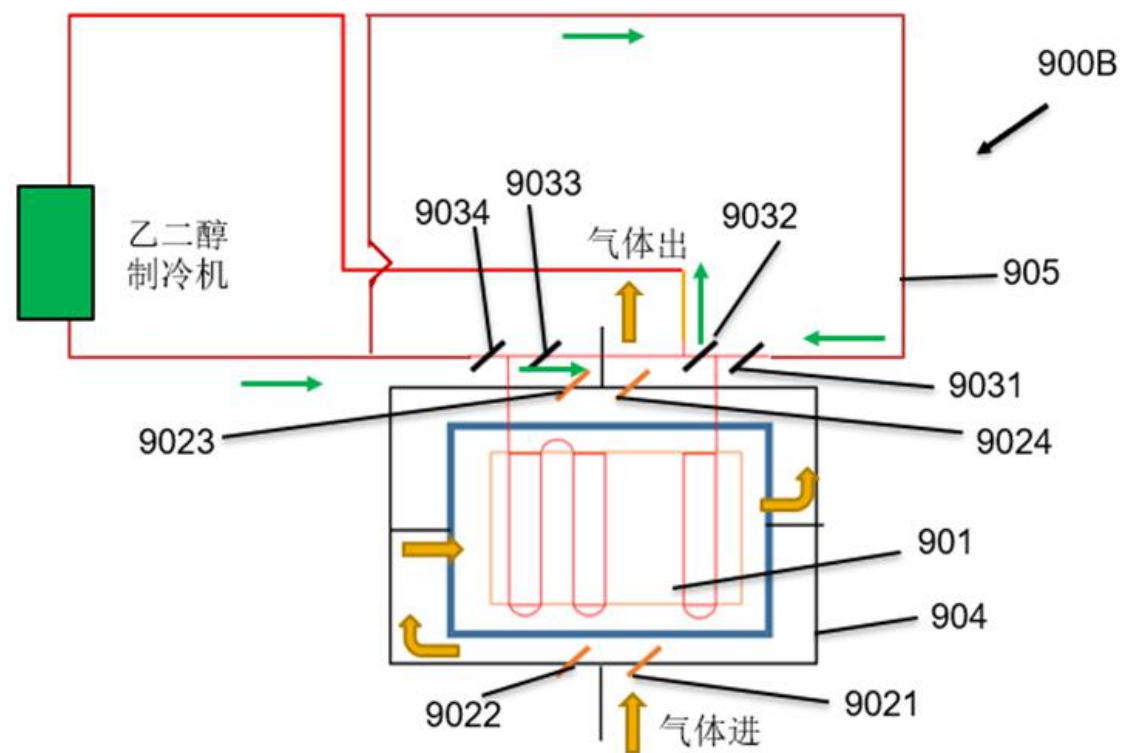
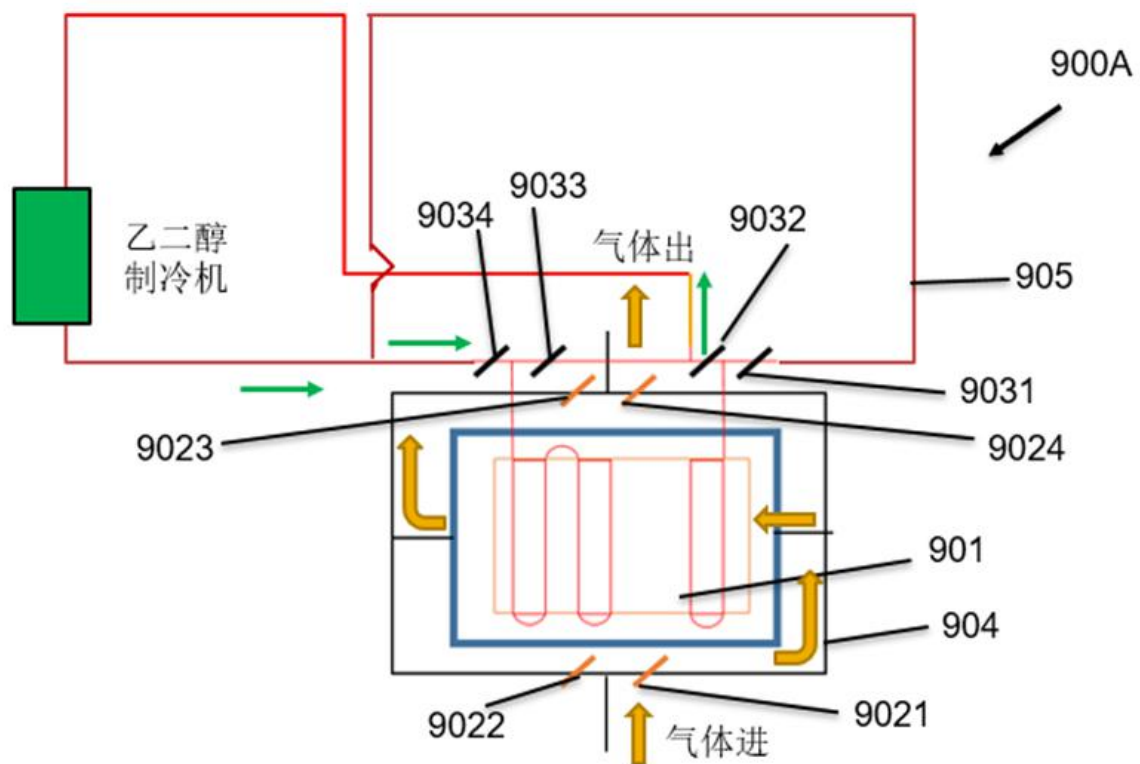
载冷剂换向



载冷剂换向/气体旁通



气体换向/载冷剂换向



五、压缩空气典型系统应用



- ❖ 典型系统包括超低露点系统，低露点系统，高露点系统及超低露点/低露点系统
- ❖ 系统分为南方，北方典型气候，和通用型
- ❖ 系统还分为一级压缩系统，二级双螺杆，和离心三级压缩

- ❖ 空气压缩能耗占到总发电量的10%，能耗巨大，考虑到其它气体压缩，能耗占比更大。
- ❖ 压缩过程50%或者更多的电耗转换成了低品位的热，无法合理利用，即使利用，其能量贬值也不可避免，因此需要尽量减少热的产生，而不是如何利用余热。
- ❖ 压缩气体除湿要求高，能耗大。
- ❖ 冷或者干的大气是免费的能源和资源，可以有效利用。
- ❖ 热湿问题是核心问题，需要优化的技术手段和流程应对。

-蔡茂林. 压缩空气系统的能耗现状及节能潜力[J]. 中国设备工程, 2009 (7): 42-44.

-吴佩林, 王建军, 王华. 工业企业压缩空气系统节能潜力分析 [J]. 压缩机技术. 2012(1): 38-41.

-秦莉, 颜苏芊, 刘宁, 等. 吸气参数对纺织厂空压站性能影响的研究分析 [J]. 现代纺织技术. 2016, (04): 22-26.

- ❖ 气体绝热压缩的功与其绝对温度成正比，温度每减低 3°C ，功耗减少约1%，
- ❖ 高湿空气中的水蒸气同样影响压缩功，无谓的增加了压缩的气体量而多耗功，有关文献显示，每 1g/kg 含湿量减，少减少耗功0.2%-0.5%， 1g/kg (0.1%) 的水蒸气分压力约为0.2%)，
- ❖ 将 20°C ，80%的空气冷却到 -10°C ，95%，能耗下降约为12%-15%。
- ❖ 温度和湿度的减低，使得气体密度增加，增加压缩气体的产能，将 20°C ，80%的空气冷却到 -10°C ，95%，空气密度下降12%，所以总功耗基本不变。

-秦莉，颜苏芊，刘宁，等. 吸气参数对纺织企业不同类型空压机性能影响的研究分析 [J]. 现代纺织技术, 2016, (03): 36-40.

-秦莉，颜苏芊，刘宁，等. 吸气参数对无油螺杆空压机运行能耗的影响 [J]. 棉纺织技术. 2015, (11): 38-42.

-张缓缓，鲍洋洋，刘玉勇，等. 吸气温度对喷油螺杆空压机能效检测的影响研究 [J]. 通用机械. 2016, (05): 76-78.

❖ 降低压缩过程进气的温度和湿度，有两个好处，

(1) 可以提高产气量约12%，

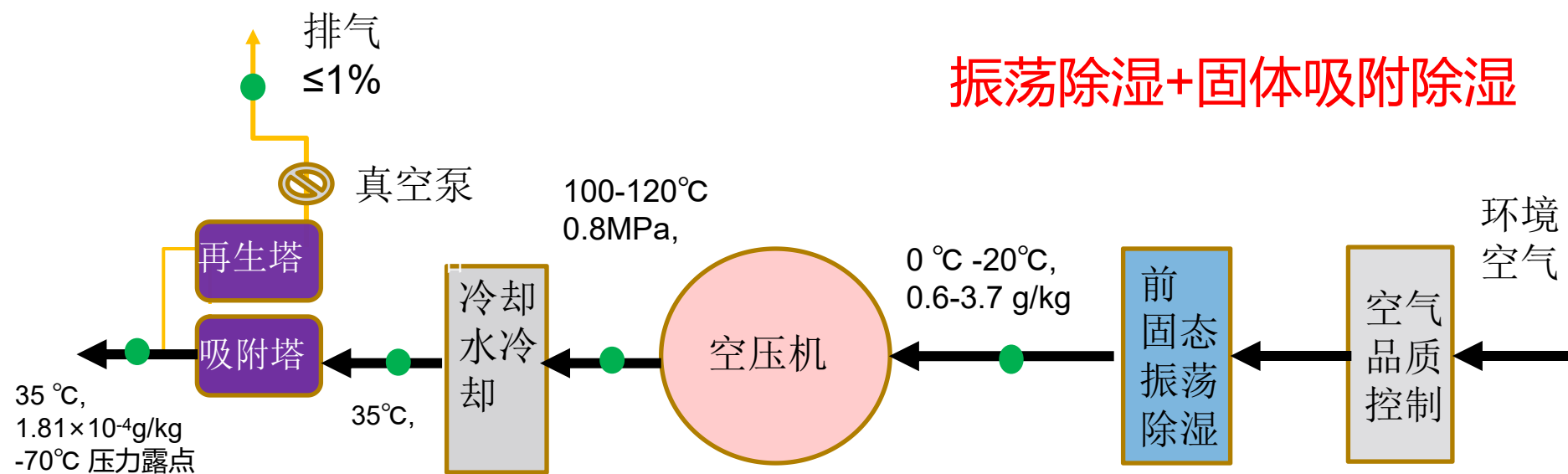
(2) 同时标准立方的产气的能耗下降12%–15%。

低温低湿的进气还有第三个好处， (3) 保证级间冷却能够充分的实现。

❖ 多级压缩采用级间冷却是提高能效的有效手段，但是，级间冷却往往又受到除湿凝水的限制，导致其冷却效果大打折扣，以当前大力推广的双螺杆压缩机为例，其冷却后的气体温度一般都为60℃左右，所以，低温低湿的进气就能保证级间冷却能够充分的实现。

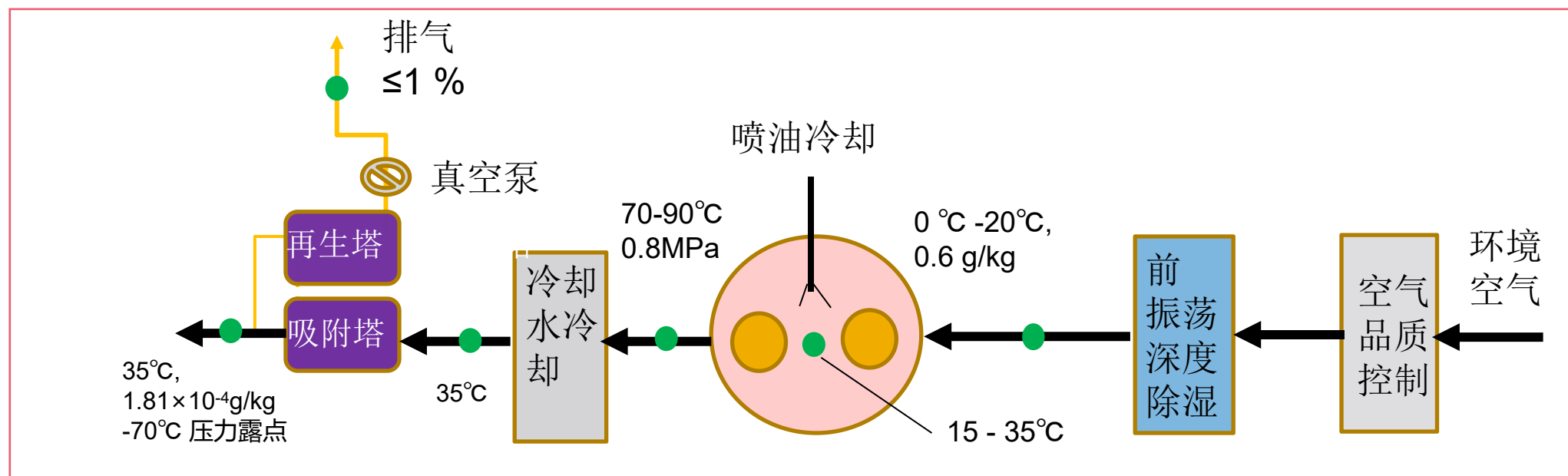
❖ 压缩气体除湿干燥要求高，其含湿量水平为0.5g/kg到 1.8×10^{-4} g/kg，比普通常压空气的含湿量相小几个数量级，压力露点5℃至-70℃，常压露点更低。

超低露点压缩空气（单级螺杆压缩/北方气候营口） （压力露点-35℃至压力露点-70℃）



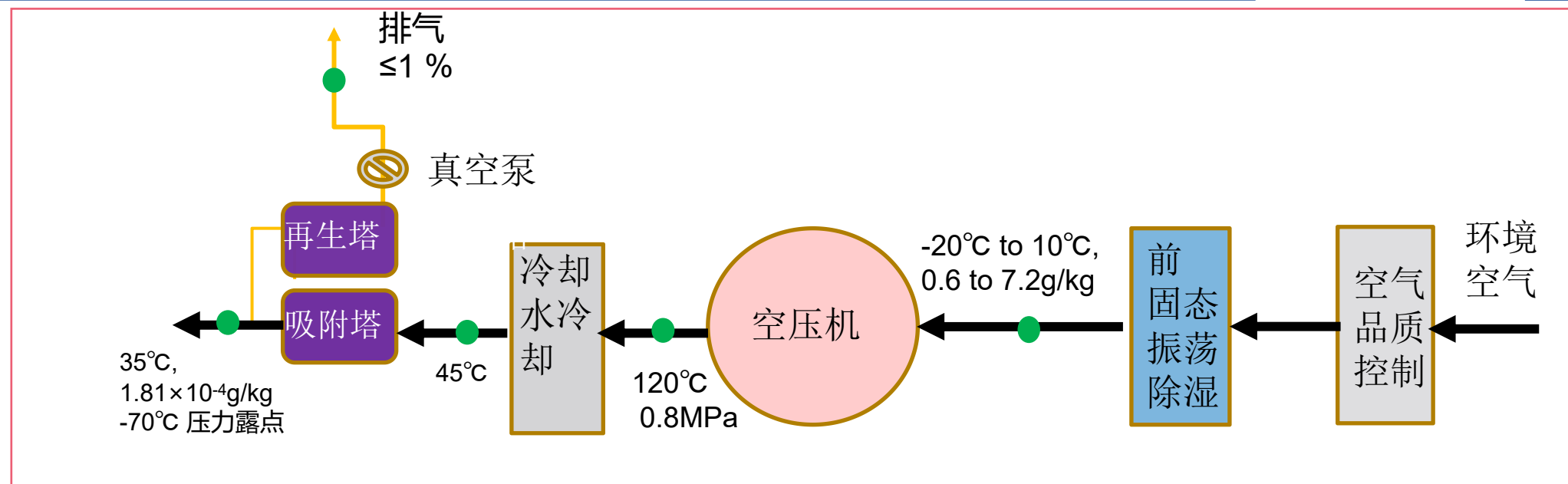
- ❖ 当环境空气为0℃到-20℃ 时，可直接利用环境空气，需要经过空气品质控制装置进行水气，水雪分离，过滤，无需开启深度除湿，全年约有2400小时；
- ❖ 当环境空气大于0℃时，利用深度除湿控制进气湿度；
- ❖ 当环境空气低于-20℃，可混合室内空气提高温度，避免对压缩机的不利影响。
- ❖ 后固态深度除湿也可充分利用环境空气；
- ❖ 吸附除湿为无热真空再生，耗气接近零，切换频率约为2-4小时，远远小于无热再生的3-5分钟切换。
- ❖ 压缩机按照0℃配置

超低露点压缩空气（两级螺杆压缩/北方气候营口） （压力露点-35℃至压力露点-70℃）



- ❖ 当环境空气为0℃到-20℃时，可直接利用环境空气，需要经过空气质量控制装置进行水气，水雪分离，过滤，无需开启深度除湿，全年约有2400小时；
- ❖ 当环境空气大于0℃时，利用深度除湿控制进气湿度；
- ❖ 当环境空气低于-20℃，可适当混合室内空气提高温度，避免对压缩机产生不利影响。
- ❖ 后固态深度除湿和级间冷却也可充分利用环境空气
- ❖ 级间降温到15-35℃, 环境温度高时对应高温，均不会产生冷凝。
- ❖ 压缩机按照0℃配置

超低露点压缩空气（单级螺杆压缩/南方气候杭州） （压力露点-35℃至压力露点-70℃）

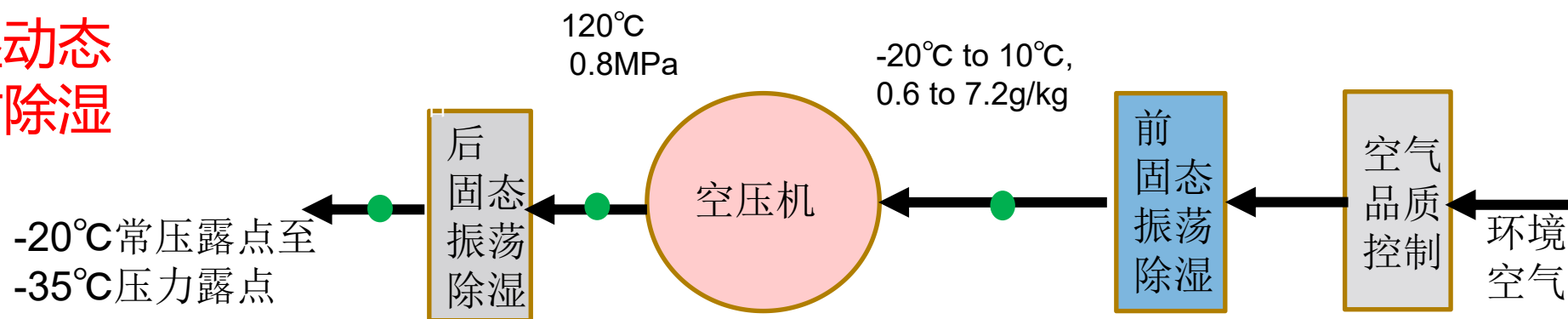


- ❖ 当环境空气为5℃以下时，可直接利用环境空气，需要经过空气品质控制装置进行水气，水雪分离，过滤，无需开启深度除湿，全年约有1000小时。
- ❖ 后固态深度除湿也可充分利用环境空气。
- ❖ 当环境空气大于5℃时，利用深度除湿调节进气温湿度，
- ❖ 压缩机按照10℃配置

低露点压缩空气（单级螺杆压缩/南方气候杭州） （压力露点-35℃至常压露点-20℃）

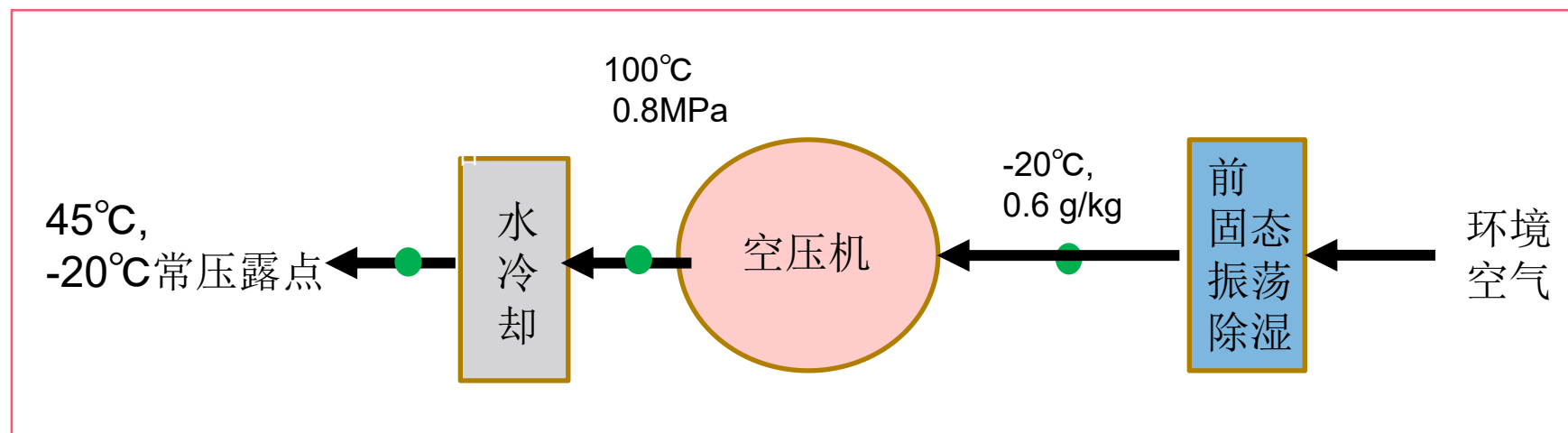


振荡除湿动态 固体吸附除湿



- ❖ 当环境空气为5℃以下 时，可直接利用环境空气，需要经过空气质量控制装置进行水气，水雪分离，过滤，无需开启深度除湿，全年约有1000小时。
- ❖ 低露点压缩空气无需吸附干燥机
- ❖ 后固态深度除湿也可充分利用环境空气。
- ❖ 当环境空气大于5℃时，利用深度除湿调节进气温湿度，
- ❖ 压缩机按照10℃配置

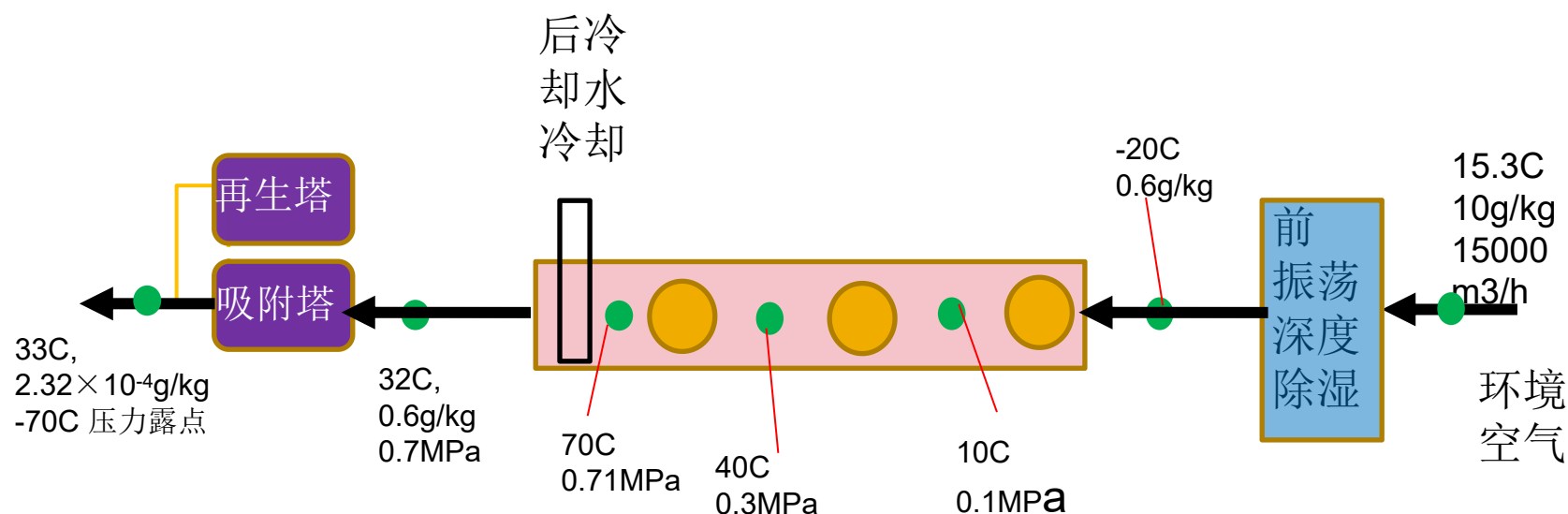
高露点压缩空气（单极螺杆压缩/通用） （常压露点-20℃以上）



- ❖ 利用深度除湿调节进气温湿度，无需后除湿装置
- ❖ 压缩机按照-20℃配置

空气预处理替代
冷干机和吸干机

三级离心压缩机系统简化



后除湿干燥

三级空气压缩机

前除湿冷却

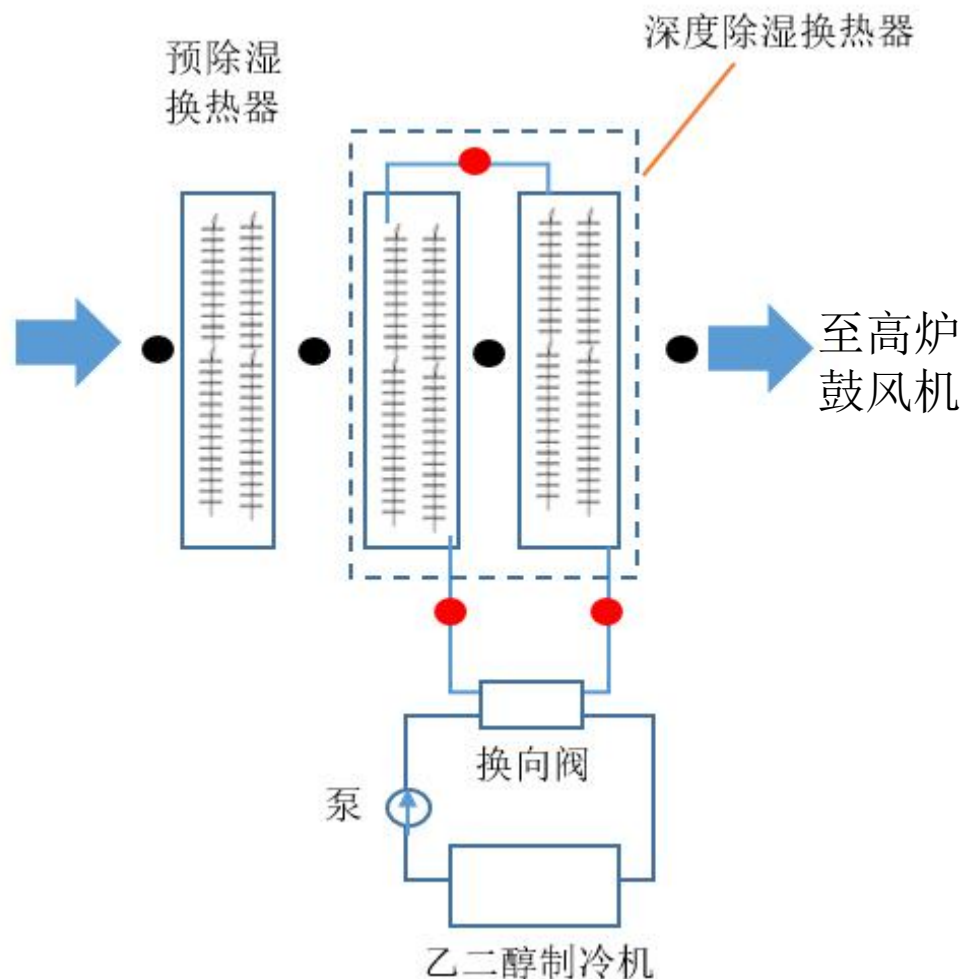
- ❖ 利用深度除湿控制进气温湿度，保持在-20C
- ❖ 三级离心压缩相对于一级，没有级间冷却，大大简化系统变为两级
- ❖ 压缩机按照-20C 配置

- 1、大幅度降低气体压缩的能耗，15%-35%。
- 2、提高气体压缩的产出
- 3、保证压缩空气的质量，低露点冷干机满足更低湿度要求，无带水，保证湿度精准控制，热功分离无热吸干机保证超低露点，无有热再生的露点漂移问题。
- 4、改善压缩机的工作条件，稳定的进气工况，无凝露保证
- 5、减少系统的复杂程度，如省掉三级离心压缩的级间冷却等，采用前深度除湿替代冷干机

六、高炉鼓风除湿

- ❖ 高炉鼓风除湿的意义不言而喻，在此不再赘述。
- ❖ 目前的高炉鼓风除湿后大多采用冷冻除湿，除湿后的含湿量一般在 7g/kg 左右，这主要是受制于冷冻除湿结霜的限制。
- ❖ 高炉鼓风除湿后的含湿量 $3\text{-}5\text{g/kg}$ 为理想的含湿量。
- ❖ 振荡除湿核心技术，采用冷冻除湿的机理，但不受制于结霜的限制。
- ❖ 除湿后的含湿量可以低于 1g/kg ，很容易实现高炉鼓风除湿的含湿量要求，即 $3\text{-}5\text{g/kg}$ 。

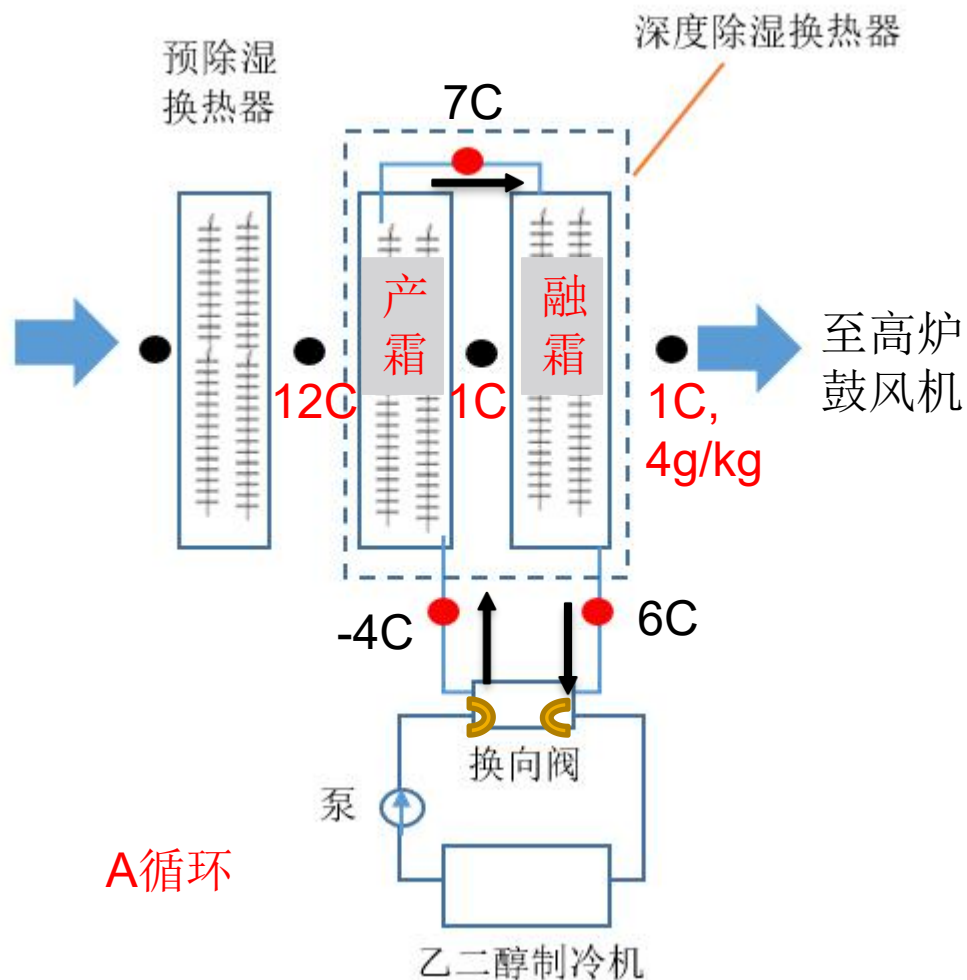
鼓风除湿系统



系统如图所示：

- ❖ 空气先经过预除湿换热器，再经过深度除湿，然后送至高炉鼓风机进口。
- ❖ 预除湿可采用余热型吸收式制冷机，或压缩式制冷机。
- ❖ 深度除湿采用乙二醇制冷机，利用特殊的振荡除湿换热器，可以在产霜条件下连续的制冷除湿。

振荡除湿循环



➤ 振荡除湿在A循环和B循环之间振荡，

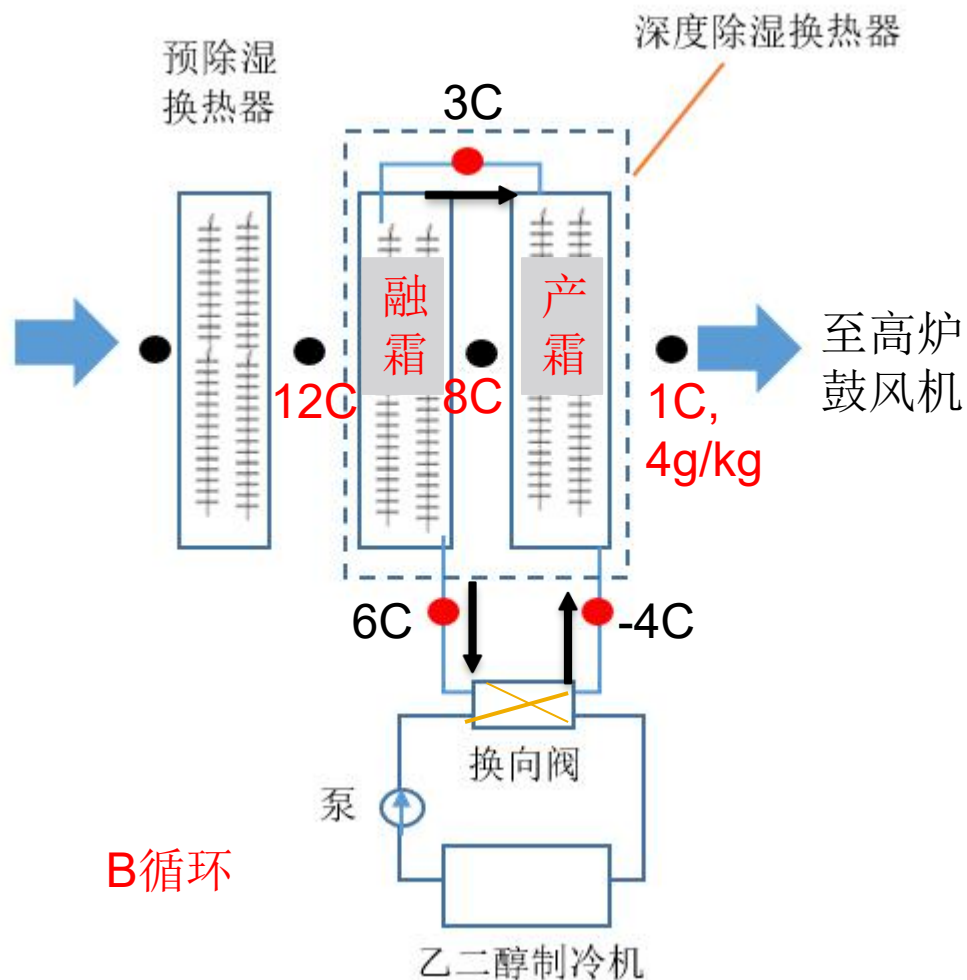
乙二醇温度低于零度产霜
乙二醇温度高于零度融霜

➤ 通过乙二醇换向阀切换

➤ A循环，
左侧换热器产霜，
右侧换热器融霜

➤ B循环，
右侧换热器产霜，
左侧换热器融霜

振荡除湿循环



➤ 振荡除湿在A循环和B循环之间振荡，

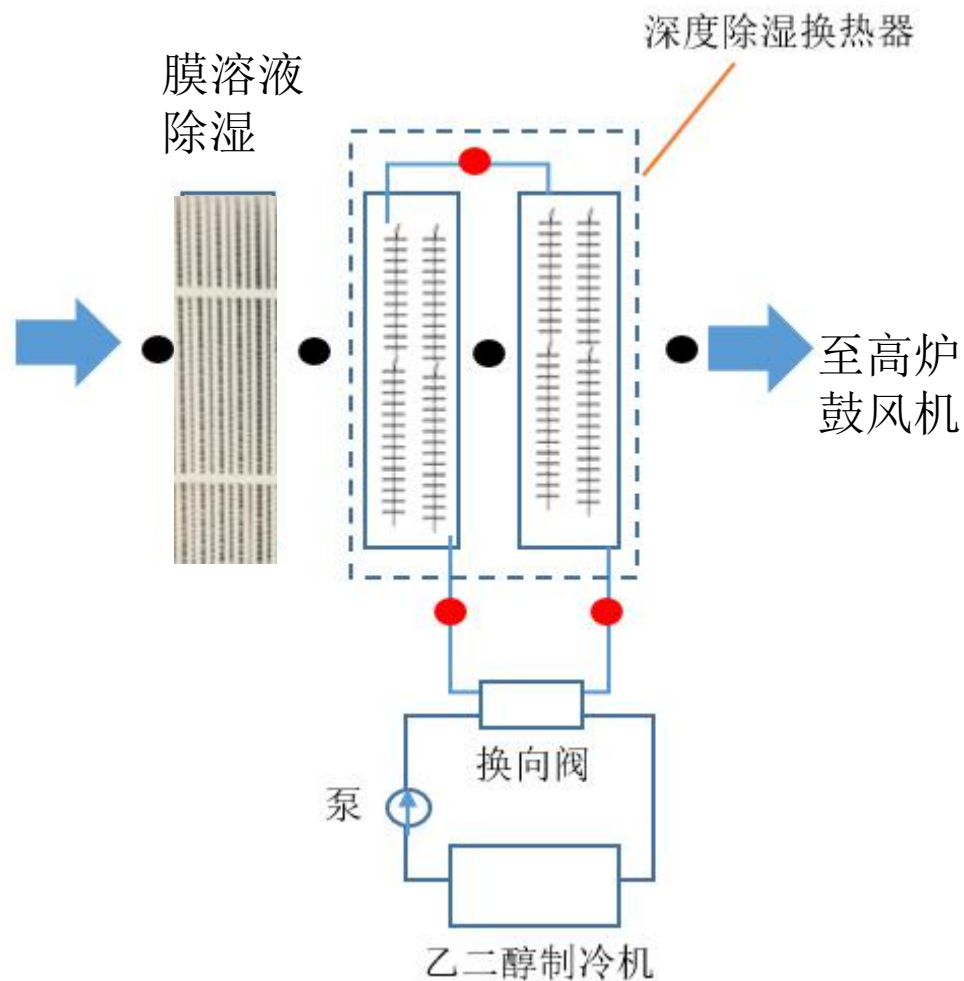
乙二醇温度低于零度产霜
乙二醇温度高于零度融霜

➤ 通过乙二醇换向阀切换

➤ A循环，
左侧换热器产霜，
右侧换热器融霜

➤ B循环，
右侧换热器产霜，
左侧换热器融霜

溶液除湿+振荡除湿



系统如图所示：

- ❖ 空气先经过预除湿换热器，再经过深度除湿，然后送至高炉鼓风机进口。
- ❖ 预除湿采用膜溶液除湿
- ❖ 深度除湿采用乙二醇制冷机，利用特殊的振荡除湿换热器，可以在产霜条件下连续的制冷除湿。

膜芯体结构

- 半透膜芯体由半透膜、膜载体、通道支撑等构成。
- 通道支撑是精密的模压加工件，保证精度。
- 膜载体为一种特殊的多孔材料。
- 半透膜为高透气的纳米膜，在高透气同时，又有大的承压能力保证不漏液。
- 芯体加工采用特殊的工艺，能保证精度地批量生产。
- 半透膜芯体形成两个隔离的通道：空气通道和溶液通道。

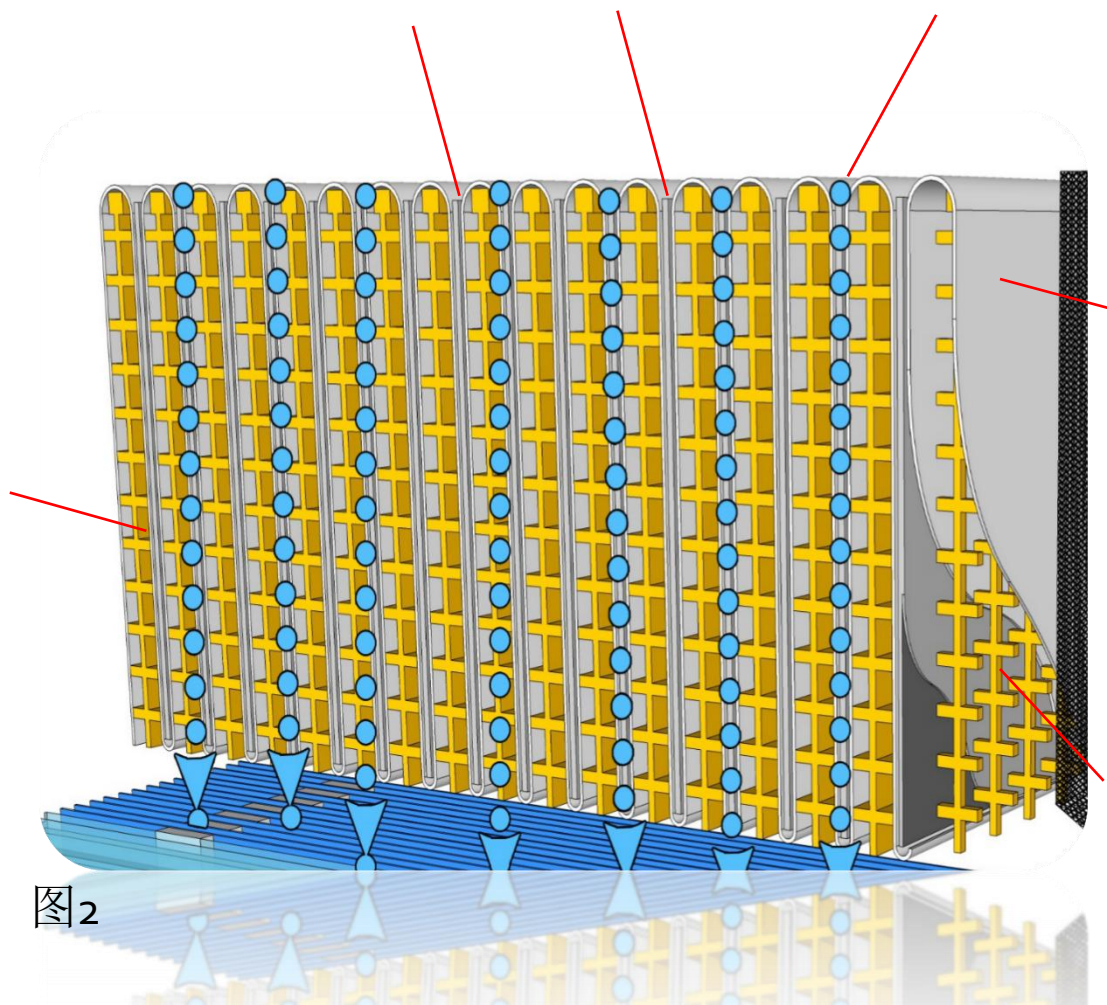
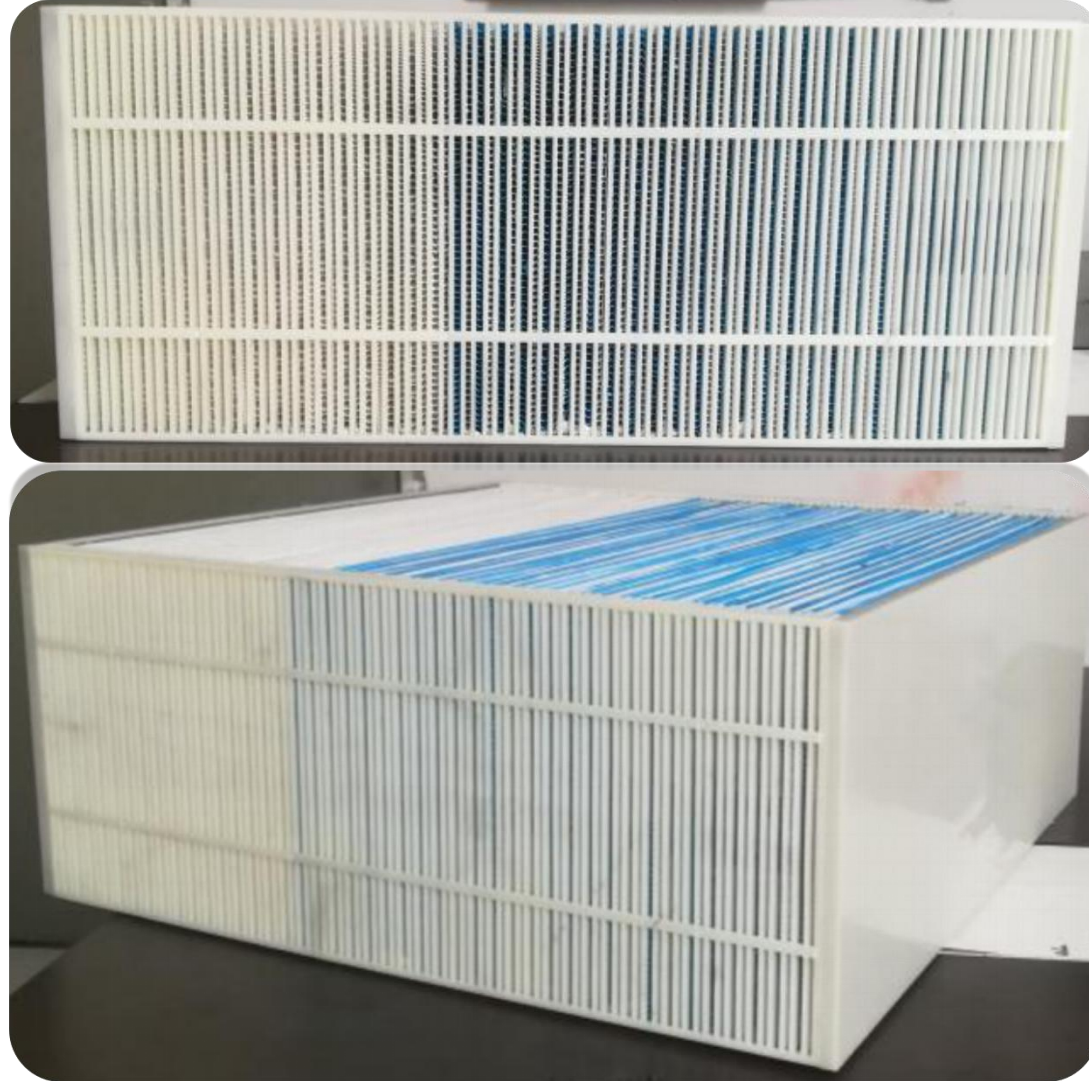


图2

膜芯体



中国西部制冷空调技术研讨会 ——工业建筑设备节能专题研讨会



谢谢!

袁一军

yuanyijunc@msn.com

中国·上海
2021.4.8