

上海制冷展热泵论坛

工艺热泵技术研究进展

张振涛 研究员

中国科学院理化技术研究所低温工程与系统研究中心
中国轻工业食品药品保质加工储运装备与节能技术重点实验室

上海 2021年4月8日

报告 目录

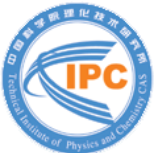
contents

1. 团队简介
2. 工艺热泵
3. 干燥应用
4. 锁鲜炮制
5. 工艺增焓
6. 小结展望

01

CHAPTER

团队简介



团队负责人



团队负责人张振涛

博士，博士后，中国科学院理化技术研究所**研究员**，博士生导师
青岛科技大学、天津科技大学特聘教授

- 中国科学院**关键技术人才**
- 国家重点研发专项“农特产品绿色节能干燥技术装备研发（2018YFD0700200）”**首席科学家**
- 中国轻工业食品药品保质加工储运装备与节能技术重点**实验室主任**
- 中国农机学会能源动力委员会**副主任**
- 中国机械工程学会包装与食品工程分会七届**常务委员**
- **太湖人才、锡山英才、龙城英才**

研究方向

- 能源与动力工程
- 智能农机装备
- 中药制造装备开发
- 农产品保质加工储运

学术兼职

- 中国机械工程协会**高级会员**
- **中国节能协会**热泵干燥专委会特聘专家
- **中国制冷空调协会**热泵专委会专家
- 江西省药学会十一届理事会**理事**
- 江西省药学会第一届制药工程专业委员会**委员**
- 国家电投远达环保专家委员会委员

科研业绩

- 河南省科技进步3等奖**(第一完成人)**
- 国家烟草局河南省公司科技进步特等奖**(第二完成人)**
- 制定团体标准8项，烟草局标准4项
- 出版学术**专著1部**
- 授权与申请专利**170**余项
- 发表学术论文（含SCI）**60**余篇
- 技术孵化企业**10**多家，**新三板**挂牌企业一家

02

CHAPTER

工艺热泵
中药为例

工艺过程能耗高

干燥能耗占GDP能耗
12%，农林行业干燥
能耗占行业能耗**40%**
(张璧光，2012)。

粮食、制种干燥
果蔬、水产干燥
药材、木材干燥
烟草烘烤

河流湖泊污染率>40%，
工业废水污染贡献率
66%；农产品深加工；
(张晓，2014)

污泥干化
高盐废水处理
造纸黑液处理
放射性废液处理
淀粉废水、纤维废水

化工能耗占GDP能耗
14% (李寿生，2014)

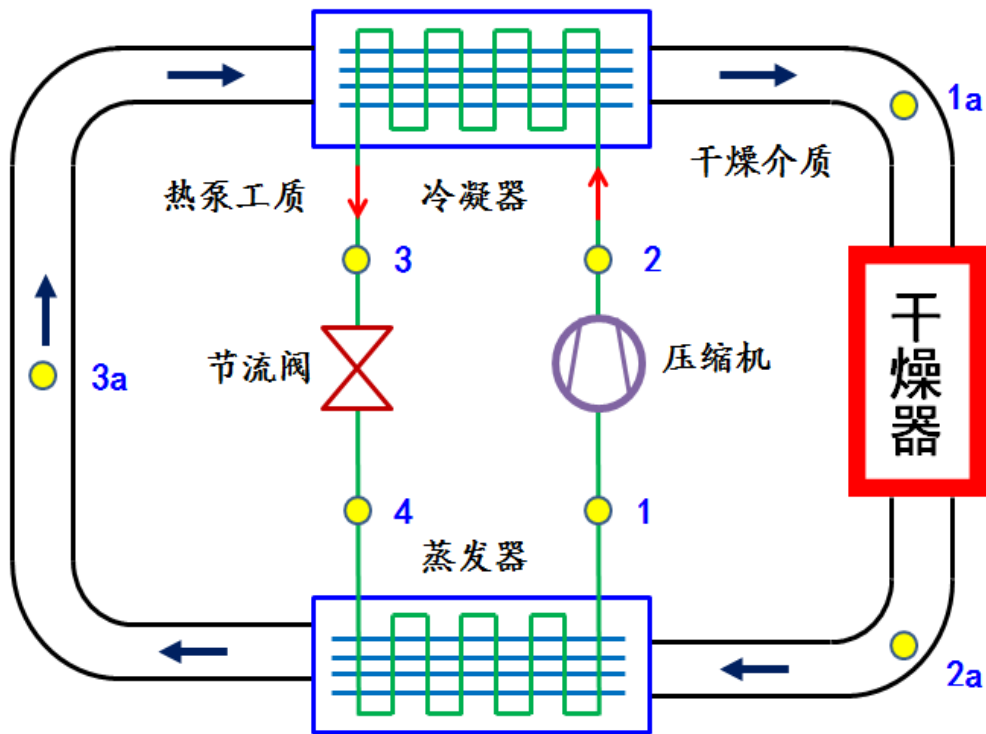
工艺蒸发浓缩结晶，制
药浓缩结晶
牛奶、果汁浓缩
精馏和分离

蒸发
汽化
相变
高能耗

废热高
效回收
与增焓
利用

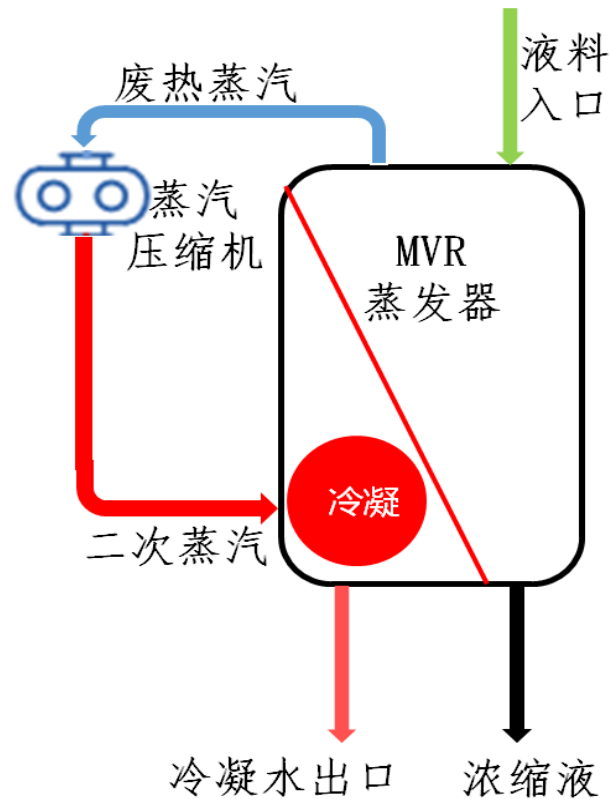
工艺热泵

废热间接增焓利用



干燥技术

废热直接增焓利用



蒸发浓缩结晶

共性：废热高效回收增焓利用

建立中药绿色存性制造装备体系

1. 中药材种植

- 集中收储转运
- 药材溯源追踪



2. 炮制初加工

- 分程变温除湿
- 提质、降耗



3. 有效成分提取

- 高效增焓提取
- 工艺精准控温



4. 中药液浓缩

- 高效增焓浓缩
- 存性消泡清洗



5. 水提液纯化

- 醇沉除杂
- 溶媒增焓精馏



10. 药物冷链物流

- 车载式制冷
- 保质储运方案



9. 药品冷藏存储

- CO2制冷机组
- 复叠式制冷机



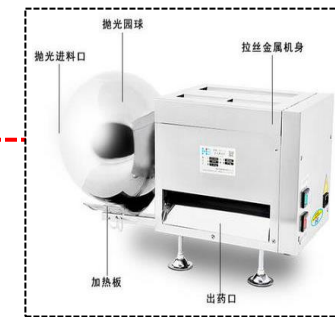
8. 成品药干燥

- 温湿度控制
- 多温段、节能



7. 制剂成型

- 丸、片、粉
- 自动化多功能



6. 浸膏干燥

- 增焓带式干燥
- 稳定性可靠性



03

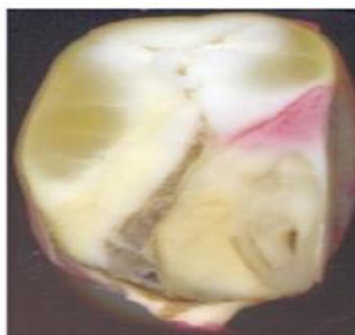
CHAPTER

干燥应用
间接增焓

干燥工艺影响品质



正常种子



热损伤种子



高品质香菇



品质劣变香菇



高质量枸杞



枸杞油果

种子合格率低：草种合格率 $\leq 50\%$ ，菜种 $\geq 30\%$ 不能精量播种，种子带菌率 $\geq 80\%$ ；造成菌类产后损失30%；中药药效改变。

传统干燥方法能耗大，污染重



燃煤烘干塔



燃煤热风炉



燃煤烘房



燃煤燃柴热风炉

干燥能耗占农特行业加工能耗 40%；燃煤干燥超过80%。

干燥工艺-变色与品质控制

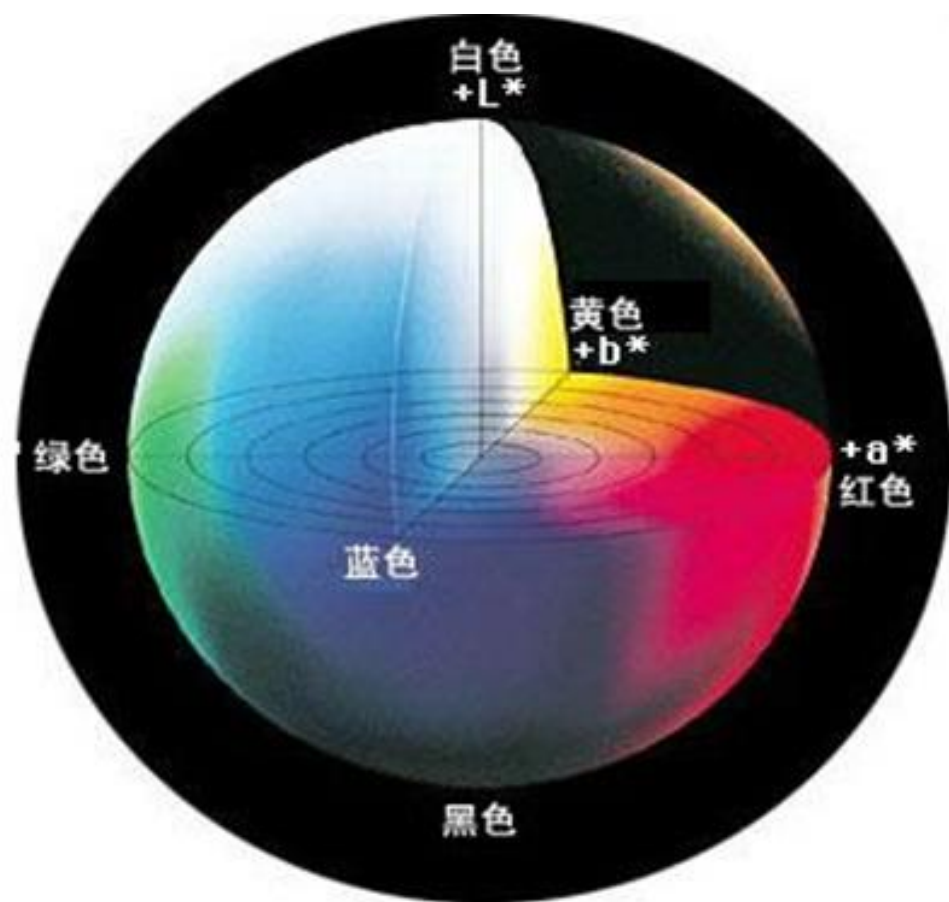
CIELab表色系示意图

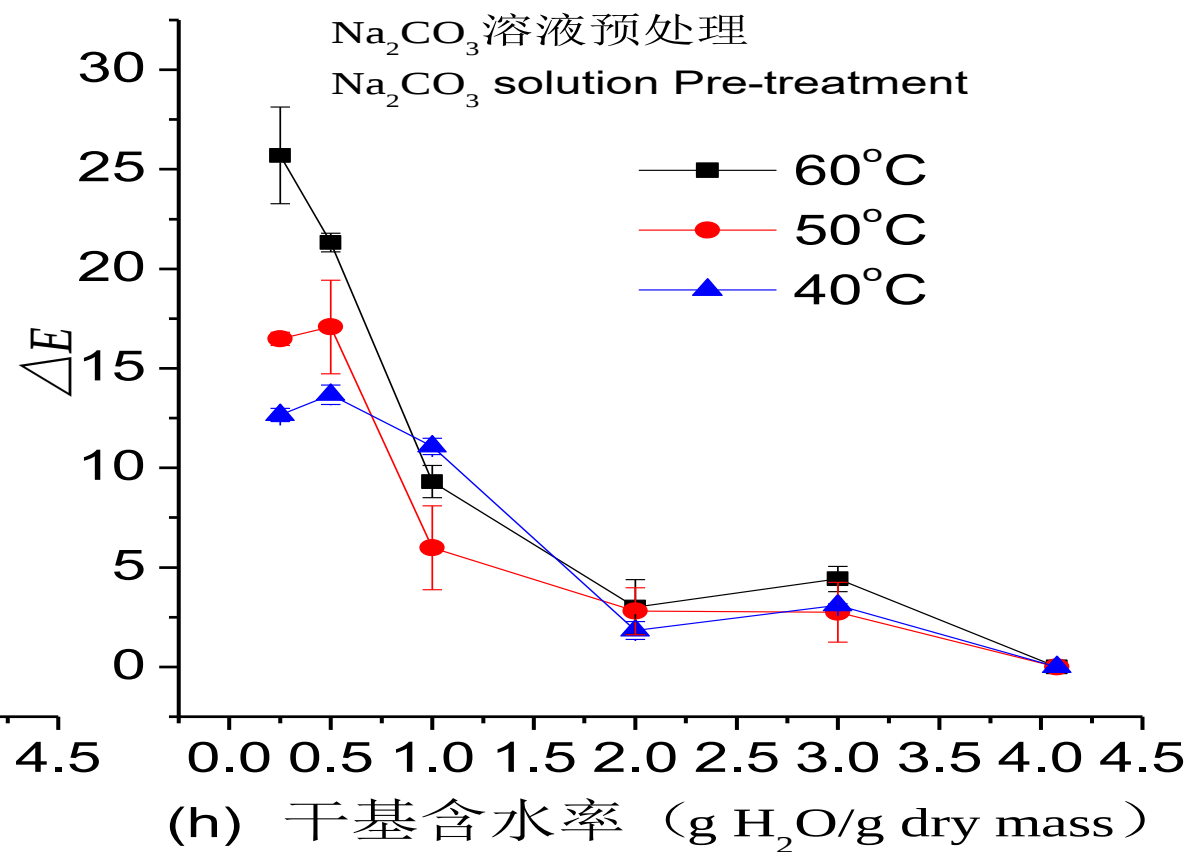
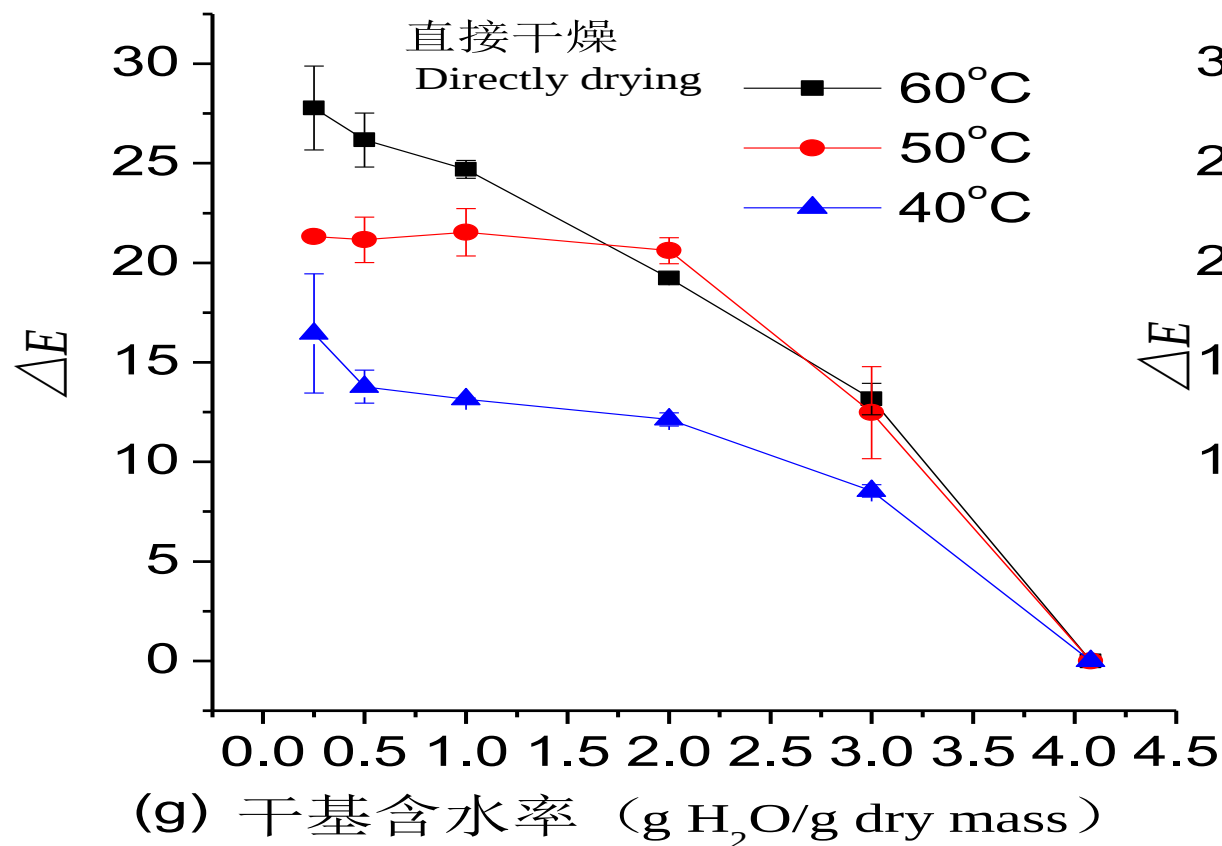
$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

L 为明度指数；

a 为红绿轴色度指数；

b 为黄蓝轴色度指数。





枸杞干燥过程颜色变化曲线
The color variation during hot air drying

3.0db



2.0db



1.0db



0.5db



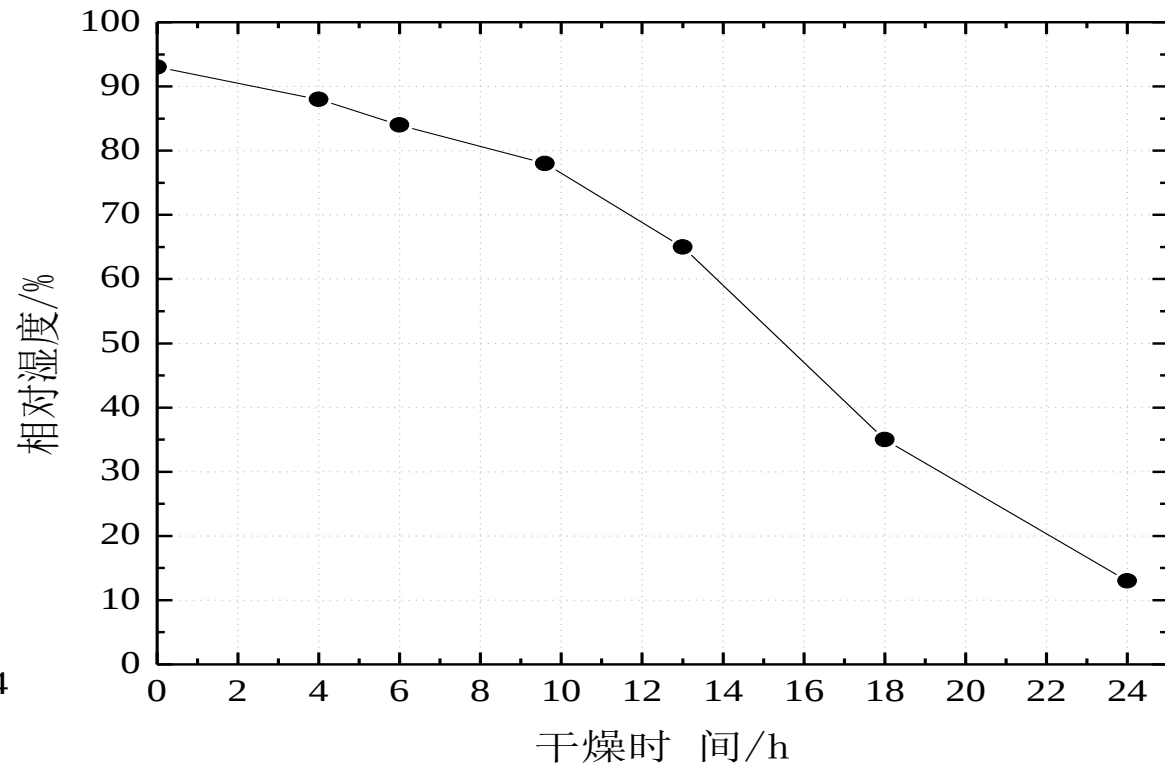
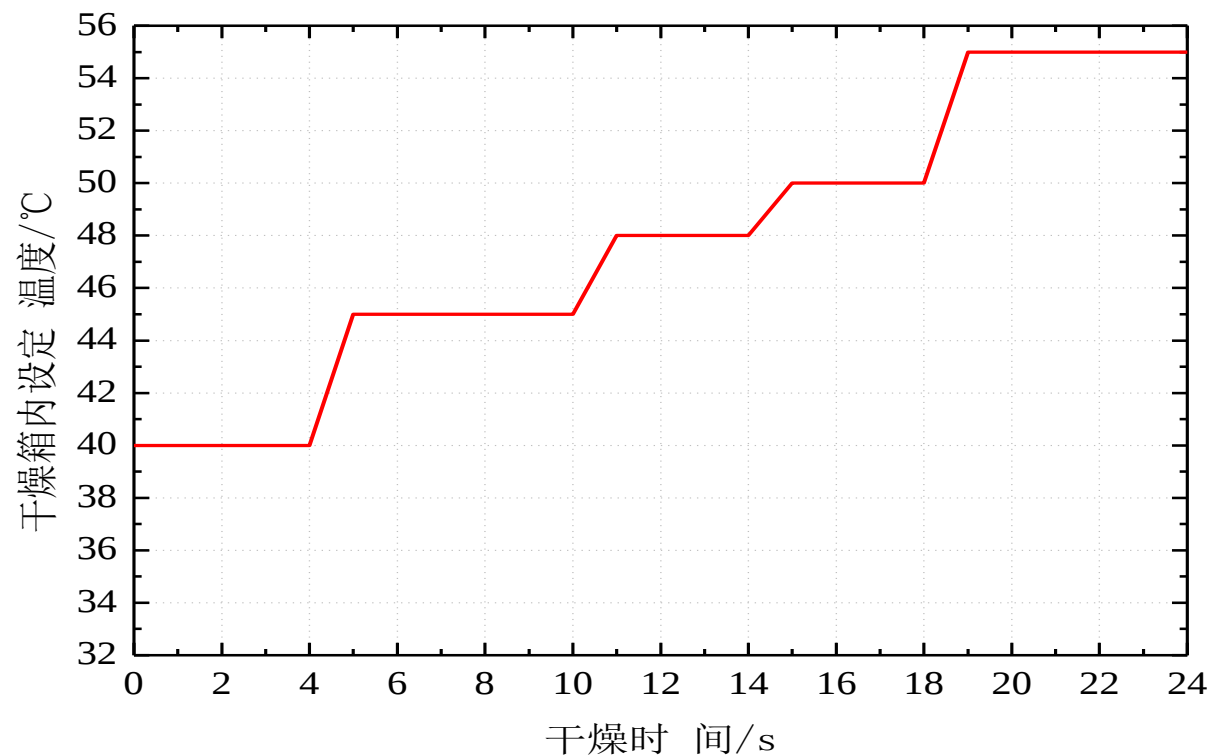
终



枸杞干燥工艺研究



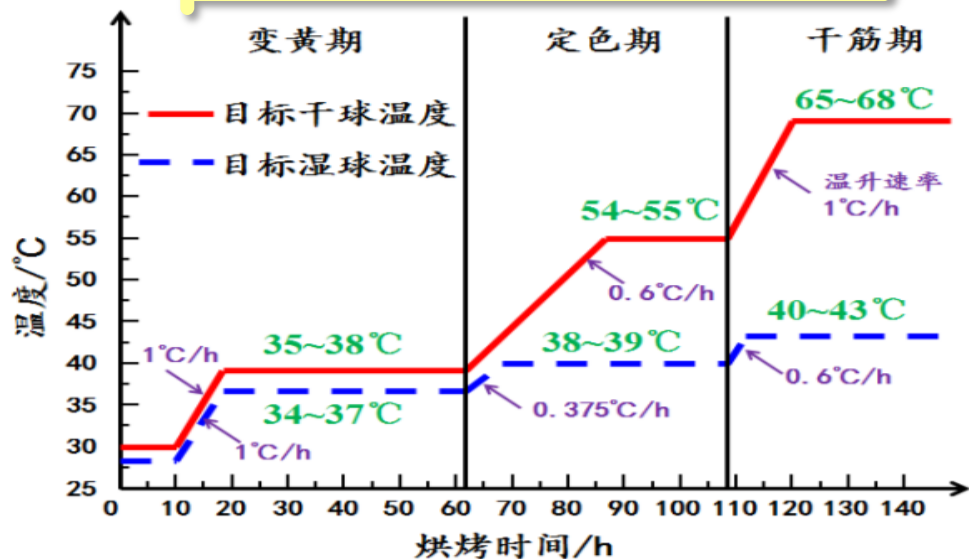
► 枸杞干燥的温、湿度控制曲线



根据热泵干燥的经验，用户可以编辑温、湿度曲线。



烟叶的三段式烘烤工艺模式



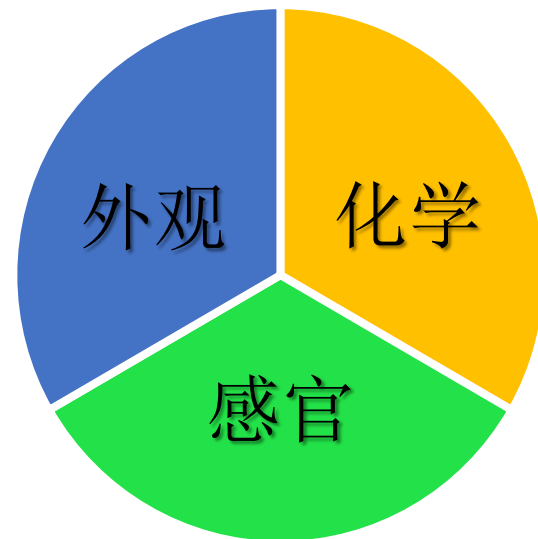
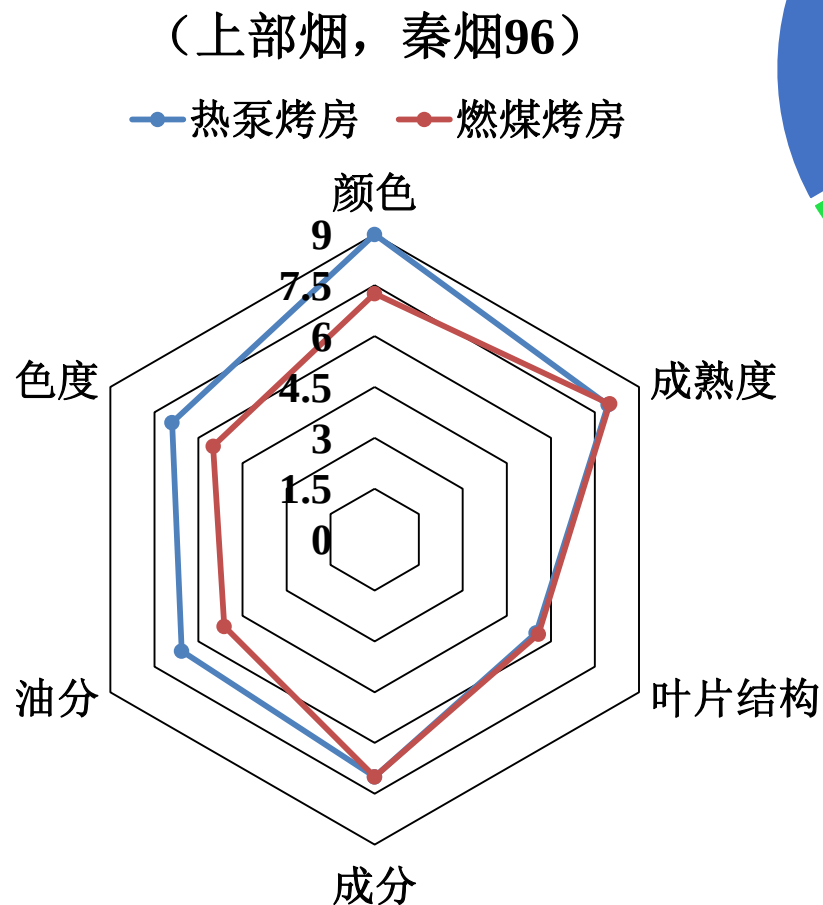
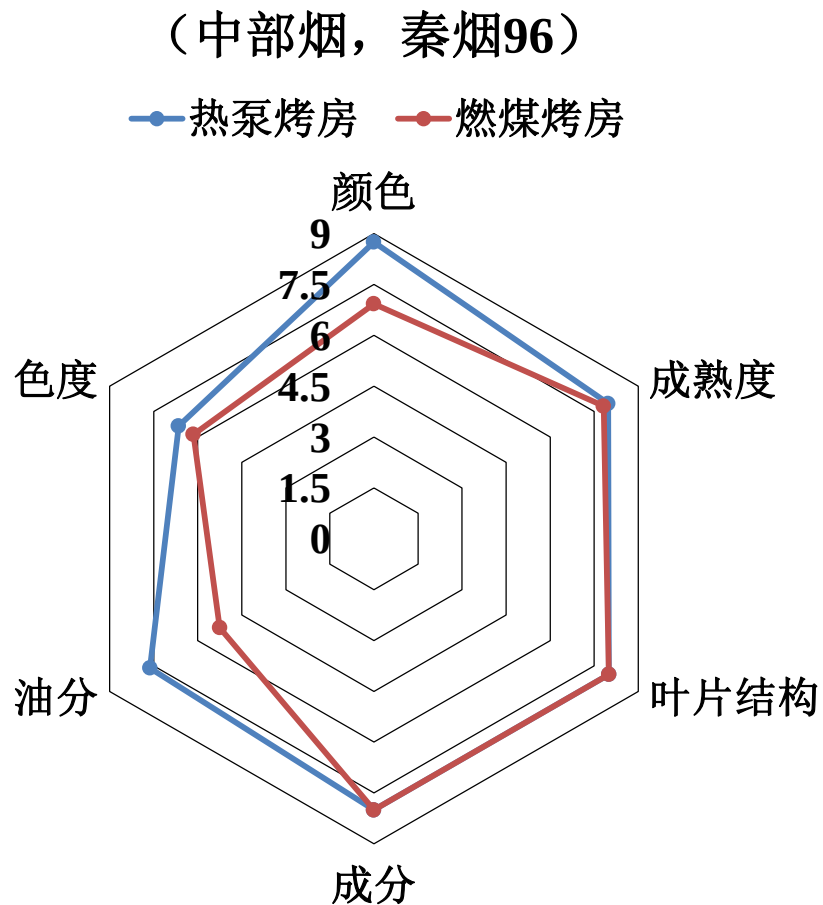
- ✓ **失水百分比速率**: 每小时内烟叶脱去的水分占鲜烟 (烤前) 含水量的百分比, 用%/h表示
- ✓ **失水速率**: 鲜烟含水量×失水百分比速率
- ✓ 鲜烟量3500kg; 初始含水率85%; 烘烤**结束时**含水率6.5%

三段式烤烟工艺对应的平均失水百分比速率和平均失水速率 (3500kg鲜烟量)

烤烟阶段	平均失水百分比速率%/h	平均失水速率kg/h
变黄期	$(30-0)/(62-0)=0.48387$	14.40
定色期	$(80-30)/(108-62)=1.087$	32.34
干筋期	$(98.8-80)/(140-108)=0.5875$	17.48

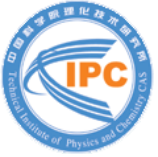
烟叶烘烤品质标准

热泵烤房与燃煤烤房烘烤质量对比^[1]



烟叶油分、颜色、色度三个方面明显好于燃煤烤房

[1] 根据郑县烟草分公司“热泵烤房实验”（2013年9月30日，陕县西李村乡烟叶烘烤工场，郭海峡[组长]，赵淑莲[副组长]）报告绘制。

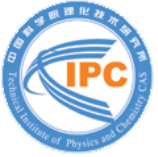


半开式热泵烤烟系统经济性分析

装烟密度试验

处理号	烟夹 数量 (夹)	单夹 重量 (公斤)	每房烟 重量 (公斤)	烘烤效果 简评	烘烤 时间 (小时)	能耗量 (度/公斤)	烤后 均价 (元/公斤)
T1		10	3900	好	168	1.86	22.3
T2	390	12	4680	一般	174	1.88	20.9
T3		15	5850	差	194	2.12	15.8
T4		10	3600	好	162	1.84	23.1
T5	360	12	4320	较好	172	1.84	22.1
T6		15	5400	较差	190	1.98	16.45
T7		10	3300	较好	160	1.88	21.5
T8	330	12	3960	较好	162	1.84	21.6
T9		15	4950	较差	180	1.93	18.5

鲜烟每炕装烟夹数量330夹~360夹，每夹夹烟10 kg~12kg较为合适



其他成果-烟叶干燥工艺研究

半开式热泵烤烟系统经济性分析

热泵烤房与燃煤烤房烘烤叶等级对比

处 理 组	下部叶				中部叶				上部叶				平均值	均价 元/kg
	上等 烟 %	上中 等烟 %	均价	上等烟 %	上中 等烟 %	均价	上等烟 %	上中 等烟 %	均价	上等烟 %	上中 等烟 %			
热泵 烤房	1	0	76.2	15.9	76.5	91.4	25.3	52.4	64.4	17.15	42.97	77.33	19.45	
	2	1.2	78.4	16.1	56.5	67	19.4	51.6	75.8	18.36	36.43	73.73	17.95	
	3	0.8	72.2	15.4	48	62.5	18.4	47	56	13.9	31.93	63.57	15.9	
平 均		0.67	75.6	15.8	60.33	73.63	21.03	50.33	65.4	16.47	37.11	71.54	17.77	
燃煤 烤房	1	0	75.6	14.8	74.5	84.5	23.2	41.5	56	14.7	38.67	72.03	17.57	
	2	0.6	75.1	14.9	51	58	17.1	48.2	62.3	16.45	33.27	65.13	16.15	
	3	0.9	57.1	13.8	48.3	52.5	16.63	34	46	12.85	27.73	51.87	14.43	
平 均		0.5	69.3	14.5	57.93	65	18.98	41.23	54.8	14.67	33.22	63.01	16.05	
对比		0.12	5.83	1.3	2.4	8.63	2.02	9.1	10.6	1.8	3.89	8	1.72	

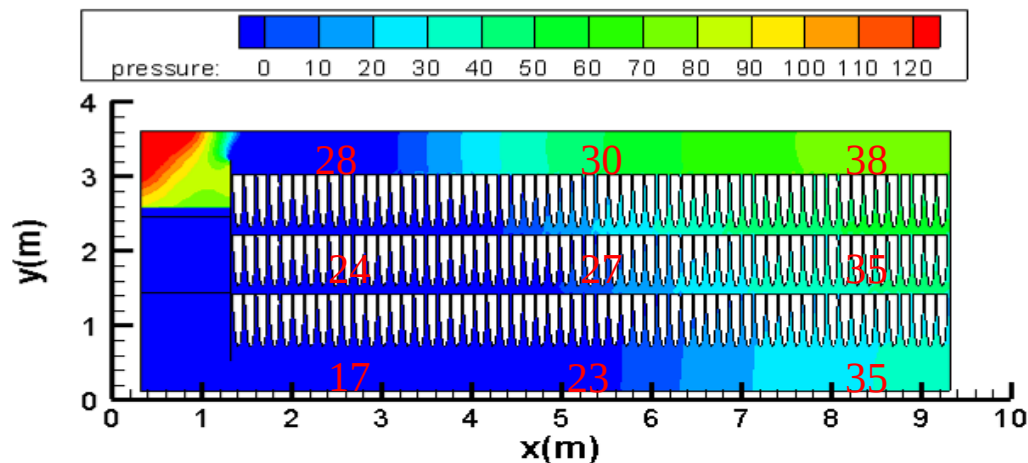
热泵烤房烘烤的烟叶上等烟比例高3.89%、上中等烟比例高8%、均价高1.72元/公斤

半开式热泵烤烟模拟

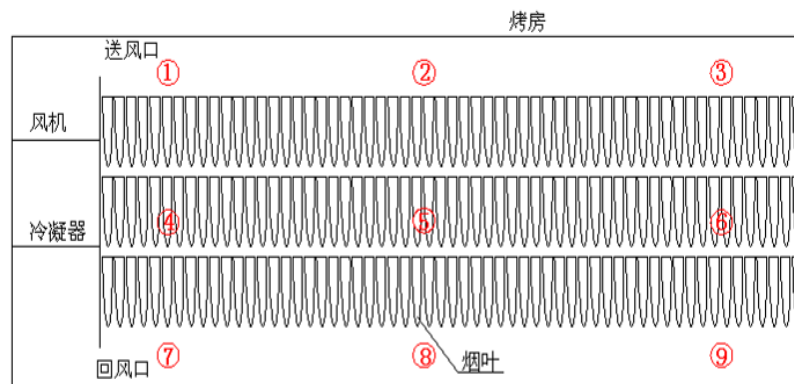
Fluent模拟的基本假设条件如下：

- ✓ 烤房内空气为不可压缩的理想气体；
- ✓ 烟叶是均匀连续介质，不与空气发生化学反应；
- ✓ 烟叶与烟叶之间的热传导忽略不计；
- ✓ 由于热空气温度不高，仅考虑对流换热，不计辐射换热；
- ✓ 烤房墙壁为绝热体，热容量忽略不计。

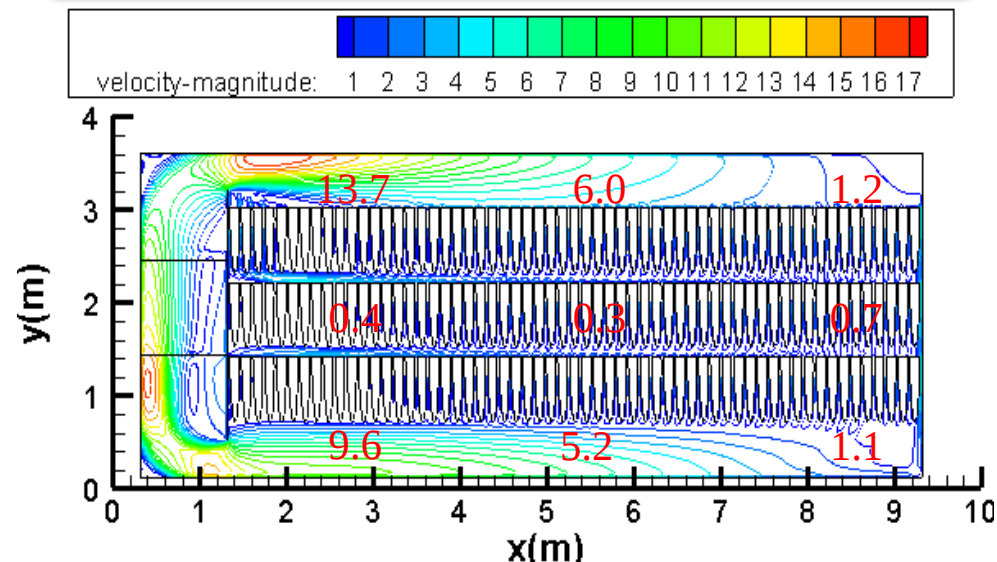
给定风机压力230Pa，烤房内风压分布



烤房内风压模拟值与实测值基本吻合



给定风机压力230Pa，烤房内风速分布



烟叶烘烤要求叶间风速0.3 m/s，模拟结果显示叶间风速在0.3-0.6 m/s之间，基本吻合

热泵烤房种类



单体拆移式热泵烤房



连体拆移式热泵烤房



分体吊装式热泵烤房



整体吊装式热泵烤房



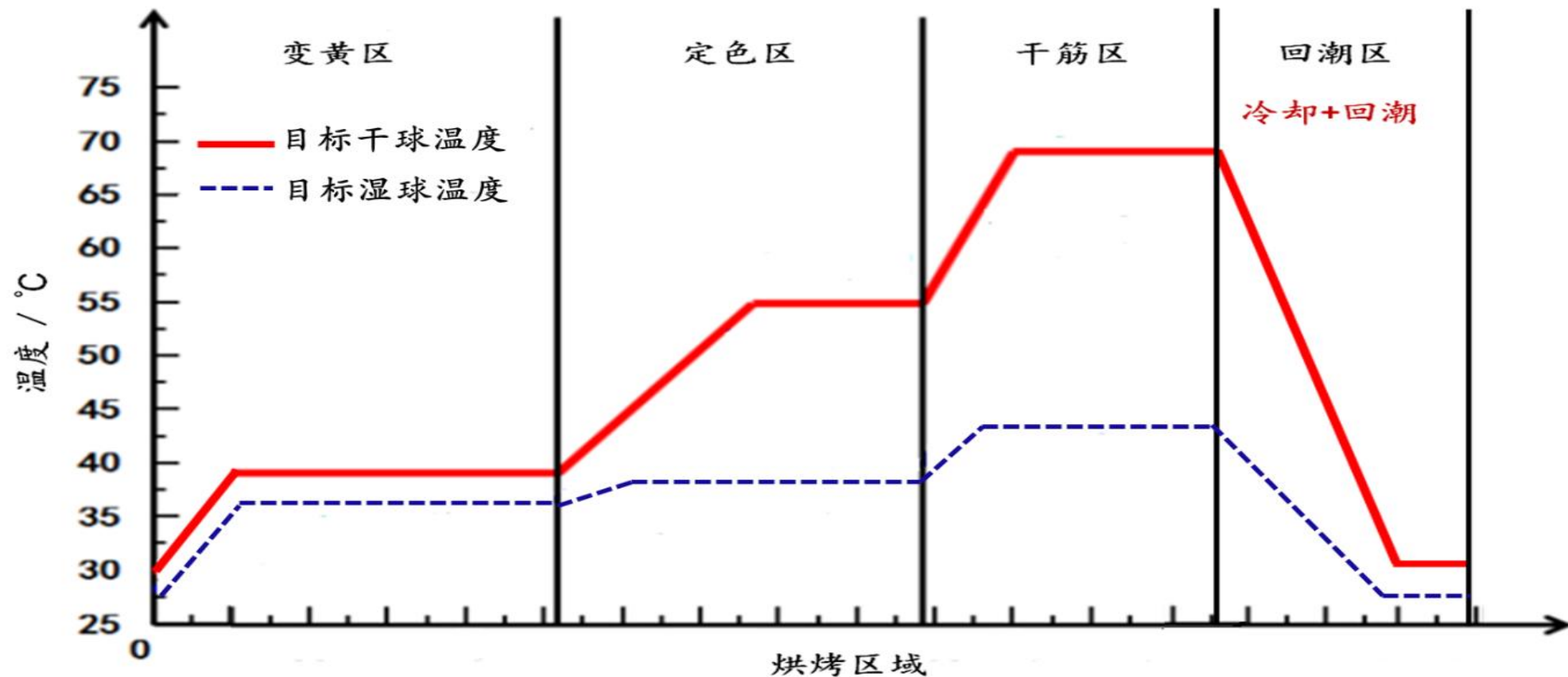
土建改造热泵烤房



太阳能热泵烤房

时空协同式热泵烤烟系统

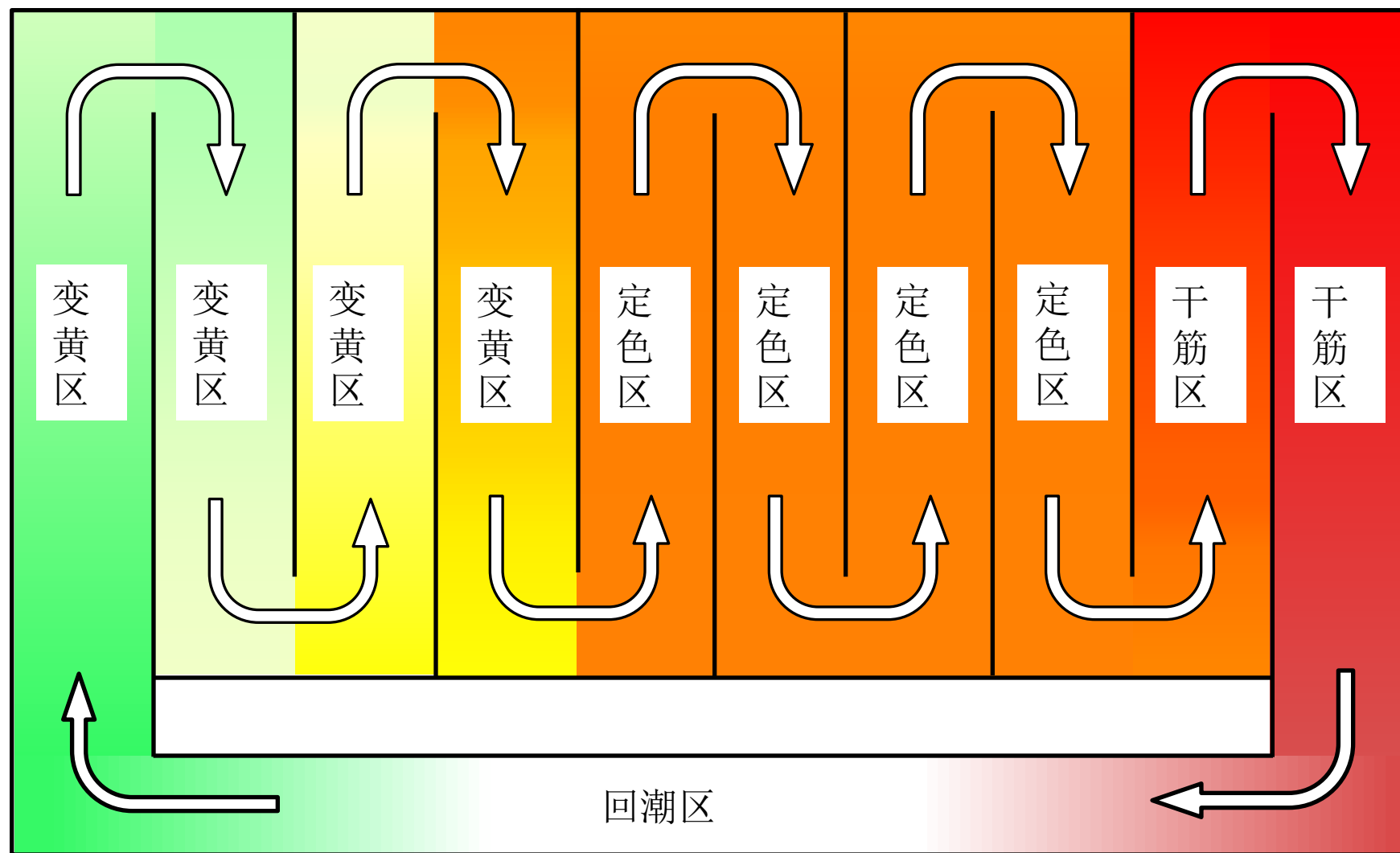
时空协同烟叶烘烤原理-时间轴与空间轴坐标变换



通过时间与空间转换，把静态烤房的时序动态烘烤工艺，
转换为连续动态空间的区段静态工艺

时空协同式热泵烤烟系统

连续动态空间与区段静态工艺分布烘烤流程



烘烤流程

装烟区将烟叶装到烟架上



装烟架放在烘烤流水线上



依次经过变黄区、定色区和干筋区



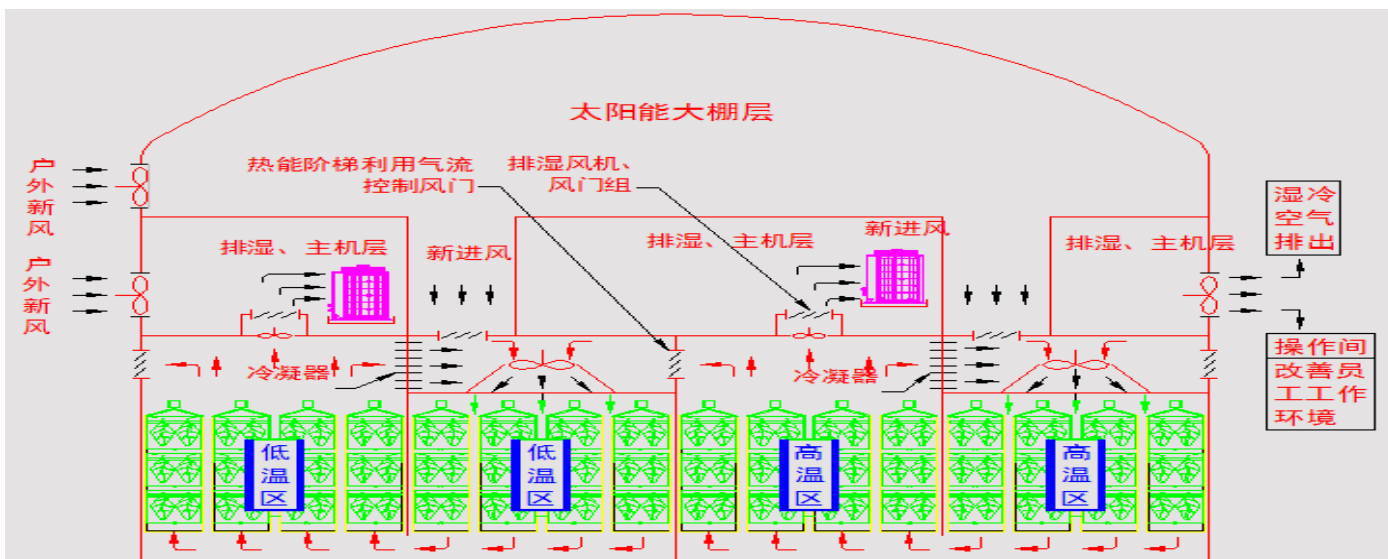
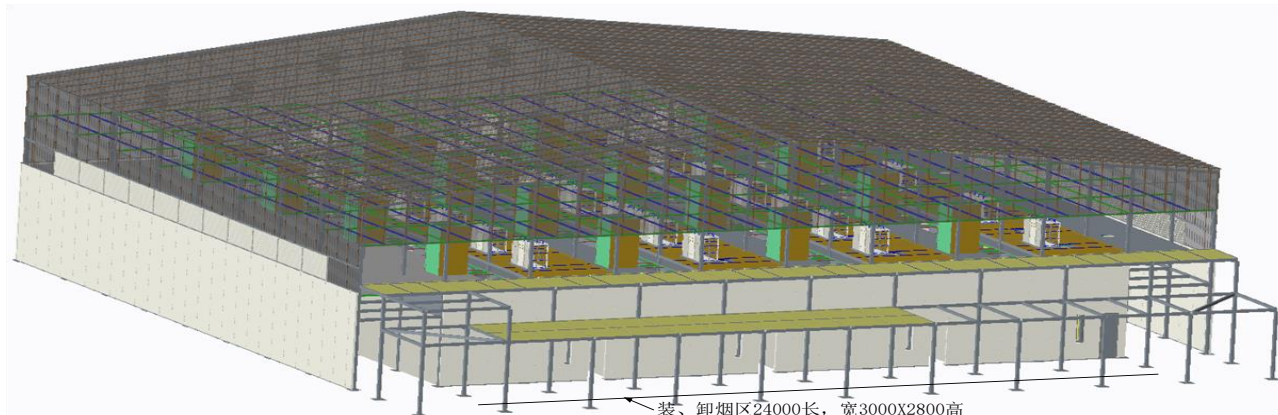
降温回潮



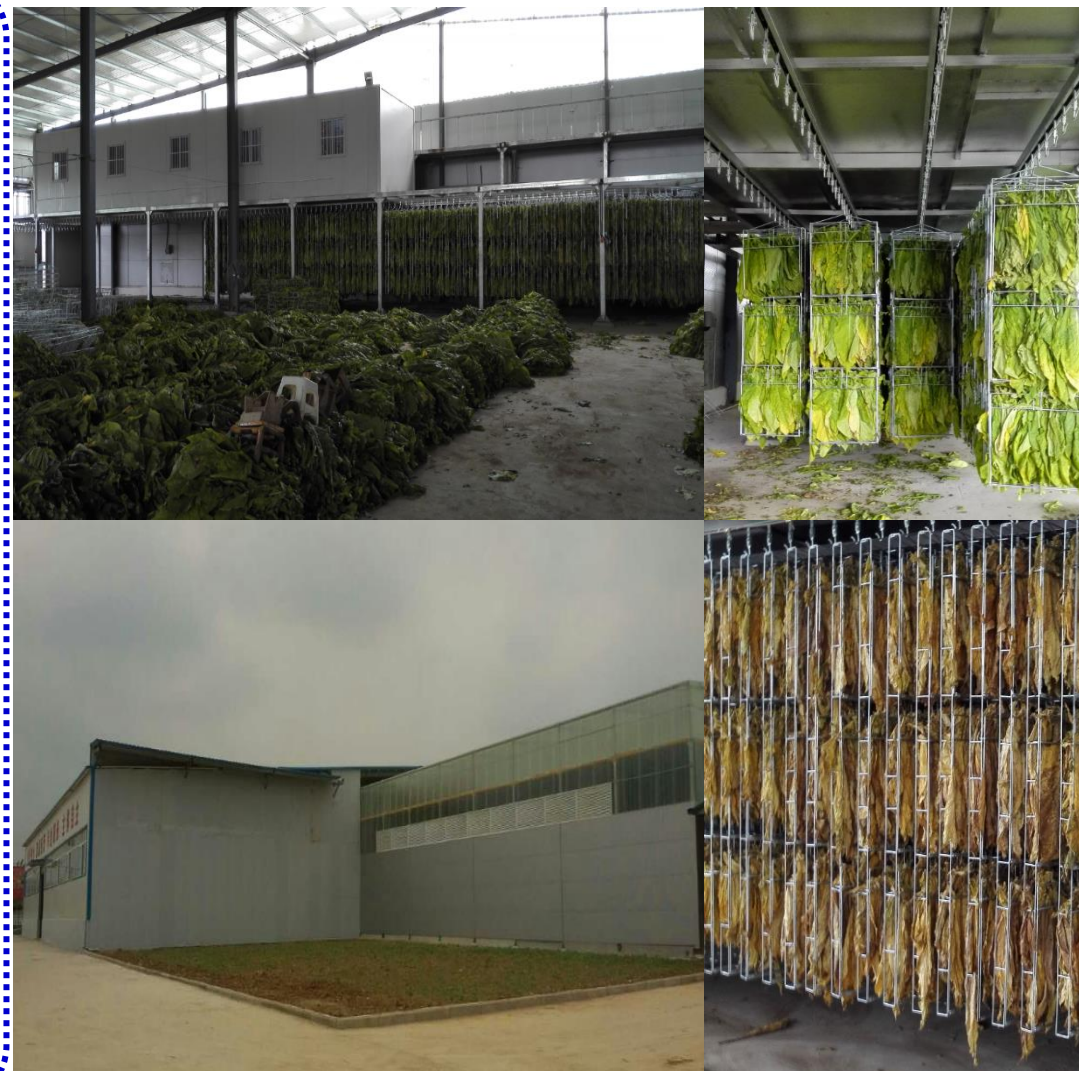
卸烟区将烟架取下，取出烟叶

时空协同式热泵烤烟系统

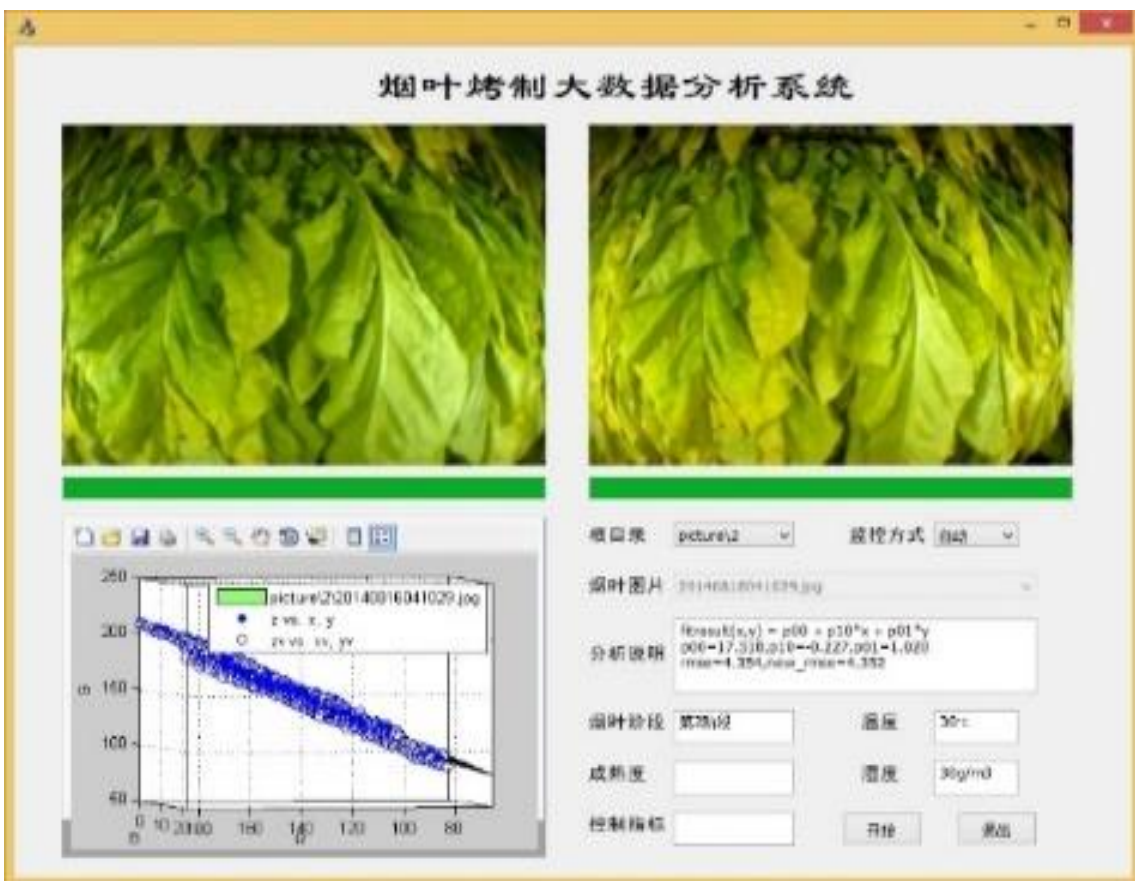
时空协调烤房结构



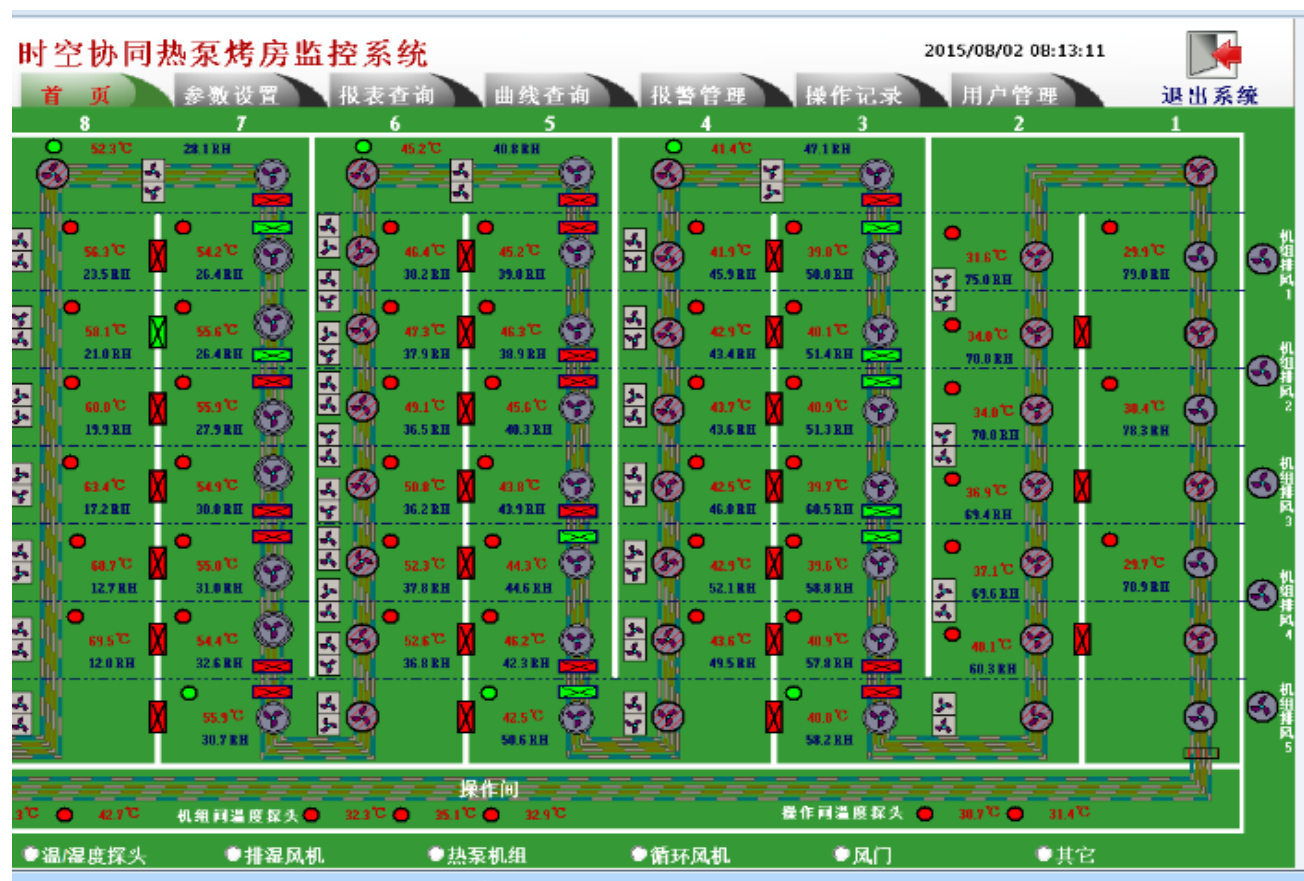
技术应用情况



智能控制与大数据



烟叶烤制大数据分析系统



微分程变温干燥工艺控制系统

烟草推广示范

在河南省内南阳、驻马店、漯河、周口、洛阳、三门峡、许昌、平顶山八个地市烟区建立了数十个烘烤工场。



南阳烘烤工场



驻马店烘烤工场



漯河烘烤工场



周口烘烤工场



洛阳烘烤工场



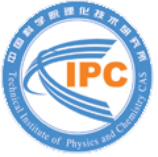
三门峡烘烤工场



许昌烘烤工场



平顶山烘烤工场



生态环境效益分析

节能70%

序号	名称	燃煤排放量 (万吨)	热泵用电排放量 (万吨)	热泵减排量 (万吨)	热泵减排率 (%)
1	CO ₂	257.1	82.06	175.05	68.09
2	SO ₂ (烟煤)	7.693	0.043	7.65	99.45
3	NO _x (烟煤)	1.386	0.030	1.356	97.84
4	PM2.5	2.132	0.0054	2.126	99.72
5	PM10	9.989	0.0056	9.983	99.94

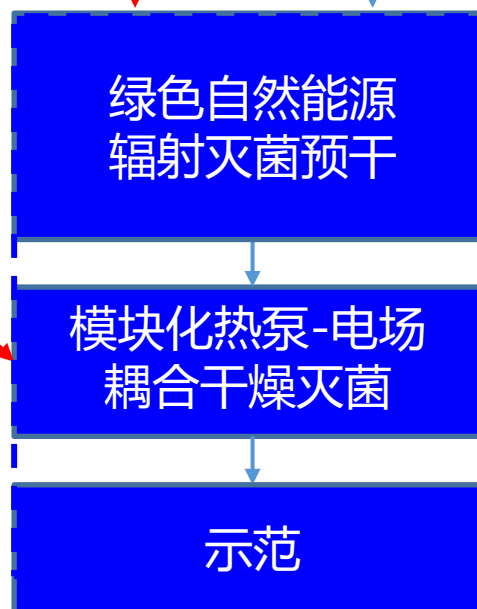
“十三五重点研发”成果-种子干燥技术和装备

基于高活力保持的种子辐射灭菌预干、热泵-电场耦合灭菌干燥一体化技术与装备示范

牧草种子干燥设备200kg/h



牧草种子 蔬菜种子



蔬菜种子干燥设备200kg/h



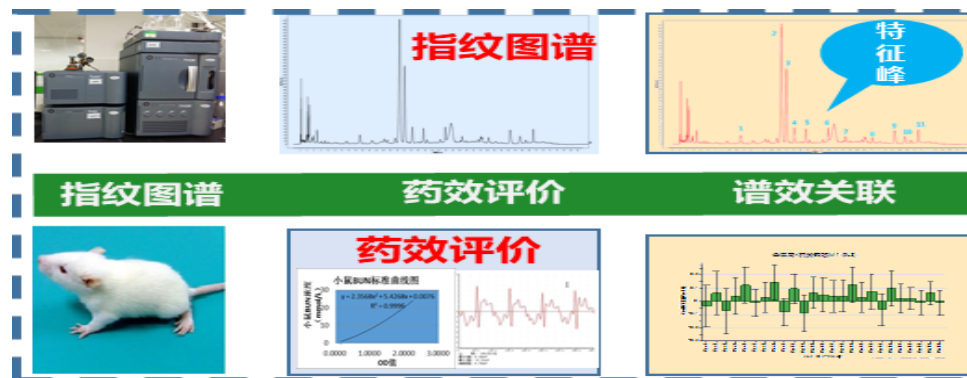
- 基于本项目成果，开发大型多功能热泵烘干塔可用于水稻、燕麦、高粱种子干燥

- 鉴于蔬菜种子多品种，小批次，设计多品种模块组合热泵电场耦合干燥装备



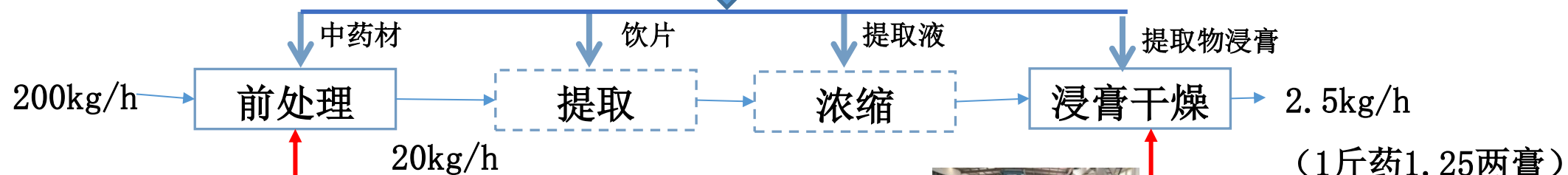
“十三五重点研发”成果-中药干燥技术和装备

基于谱效关联的中药存性炮制--预处理组合干燥技术与装备



基于谱效关联的中药绿色干燥多指标活性成分评价方法

指导优化



纳米相变流体蓄能



中药材太阳能热泵组合干燥装备示范



MVR薄膜干燥

用户证明

青海第一阳光热能设备有限公司成立于2015年5月，为国内规模最大的枸杞切片种植区域一青海都兰县本县农场的枸杞切片种植、色选等产品的加工和研发服务。拥有八大和五大两个种植基地。枸杞切片加工能力为300吨/年。公司一直追求科技创新，以产品品质提升为发展宗旨。

在国家重点研发计划“农作物产品绿色干燥装备研发”项目中，青海第一阳光热能设备有限公司承担了“枸杞切片干燥装备研发”项目。在项目实施过程中，青海第一阳光热能设备有限公司承担了“枸杞切片干燥装备研发”项目。在项目实施过程中，青海第一阳光热能设备有限公司承担了“枸杞切片干燥装备研发”项目。

以上情况属实，特此证明。

青海第一阳光热能设备有限公司

2020年10月10日

使用证明

项目概况：本项目建设内容：建设枸杞切片干燥装备研发项目。项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。

项目效益：项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。

项目评价：项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。

项目结论：项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。项目建成后，将实现枸杞切片干燥装备的研发、生产、销售。

库尔勒黑枸杞

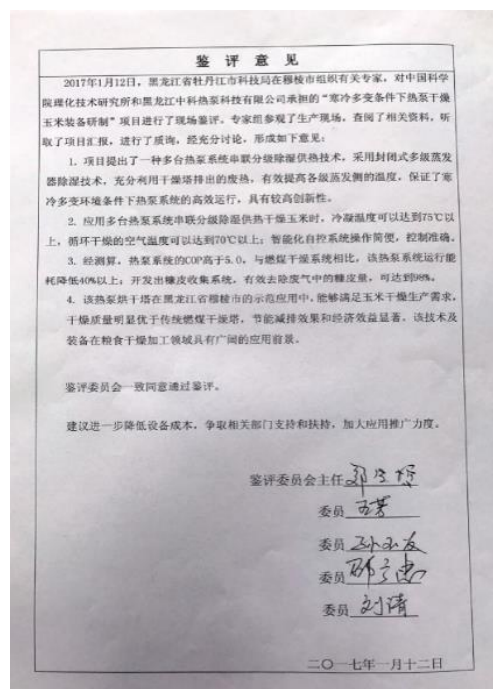
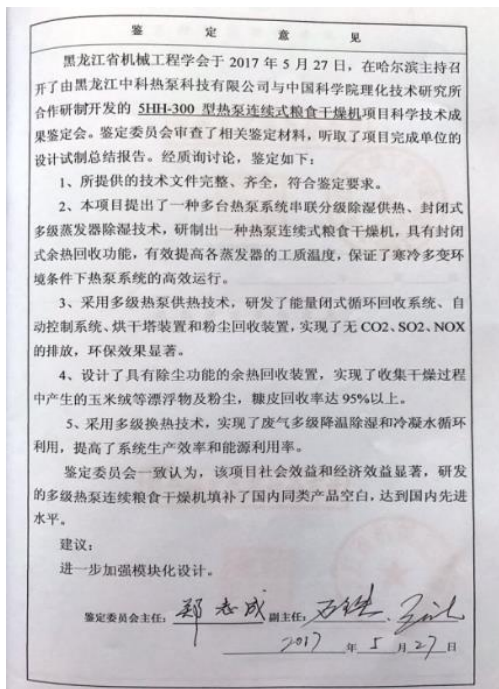




高寒区玉米高温热泵烘干技术

开发多级热泵实现-低环境温度（ $-26 \sim -30^{\circ}\text{C}$ ），（ $70 \sim 80^{\circ}\text{C}$ ）高温烘干，大于300T/d工业规模

黑龙江省组织的成果鉴定及现场鉴评



干燥前的玉米



燃煤干燥后玉米



热泵干燥后玉米



燃煤干燥200度



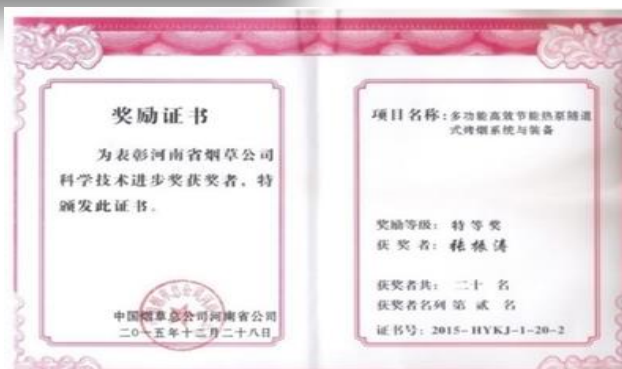
热泵干燥80度

国内首次研究在低温环境下粮食热泵烘干塔。
比燃煤干燥节能40%，颗粒物减排95%，
玉米裂纹降低30%，变色降低35%。

太阳能热泵污泥干化系统（科学院太阳能行动计划）



每天处理30 吨，全年平均吨污泥电耗费用：
日处理污泥量30 T，处理费用36.9 元/T。



时任河南省副省长张维宁、发改委副主任、环保厅厅长、农机局局长及烟草局局长考察热泵干燥



时任工信部党组成员、国家烟草局局长凌成兴和副局长杨培森考察热泵干燥



制定了我国**第一套**热泵烤烟标准，引领了中国的**烤烟**发展方向

04

CHAPTER

锁鲜炮制

04.
1

锁鲜干燥

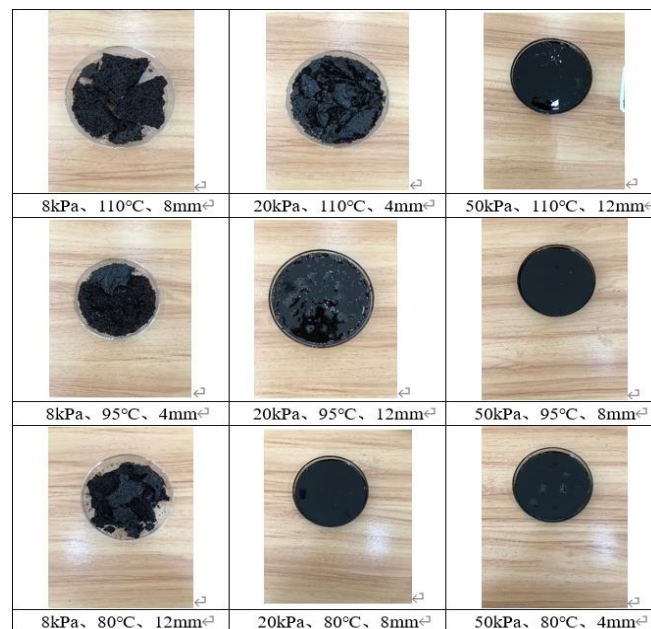
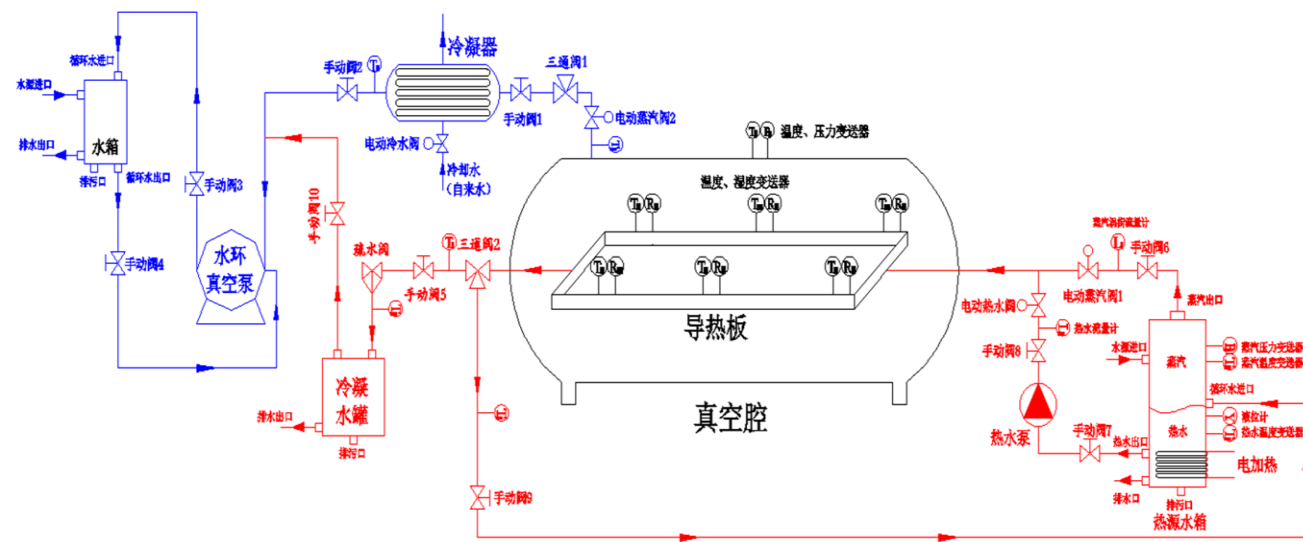
CHAPTER

□ 保质——优化干燥工艺，保证物料干燥质量

- 多因子均匀干燥调控机理
- 干燥动力学特性及质量退化规律

真空脉动干燥可以使物料的微观孔道反复挤压再扩张，使不相连的微孔连通，提高水分迁移速率，还可打破物料表面蒸气压平衡。

□ 设计并搭建中药浸膏的真空脉动干燥静态系统试验台

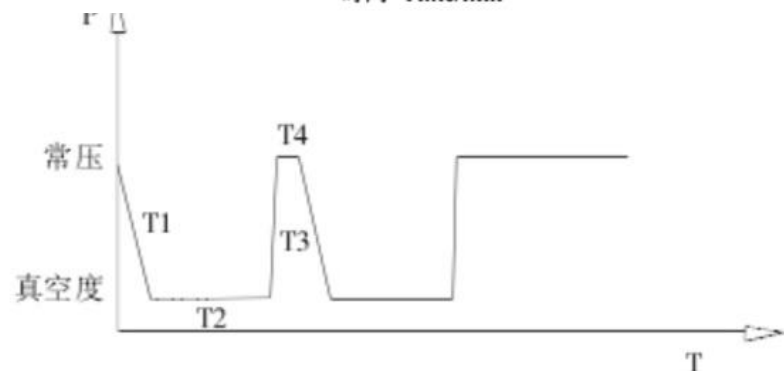
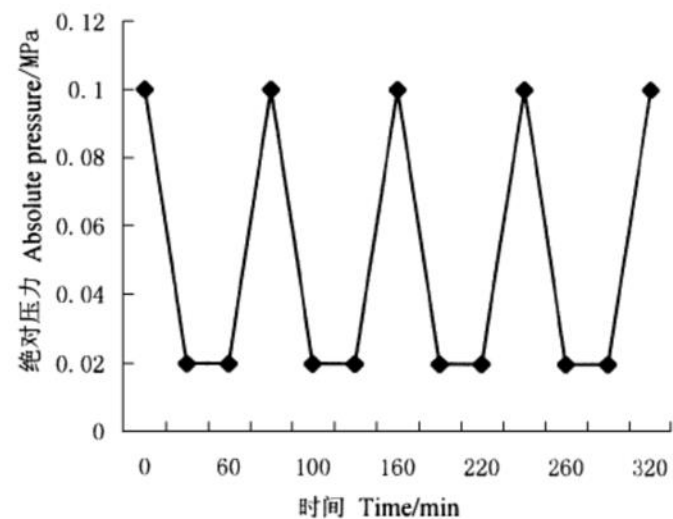


物料：桑葚浸膏、裸花紫珠浸膏、枸杞等

评价指标：干燥速率、有效成分含量、色泽、微观结构、复水性等

水性等

“十三五”成果-热泵辅助真空脉动干燥技术装备



两种真空脉动干燥压力周期示意图

枳壳干燥



常规热风干燥



真空脉动干燥

枸杞干燥



常规热风干燥



真空脉动干燥

工艺参数: 枸杞真空脉动干燥温度设置为 65 °C, 真空保持时间为 12 min, 常压保持时间为 3 min。

评价指标: 干燥室压力、干燥温度、物料内部温度等。

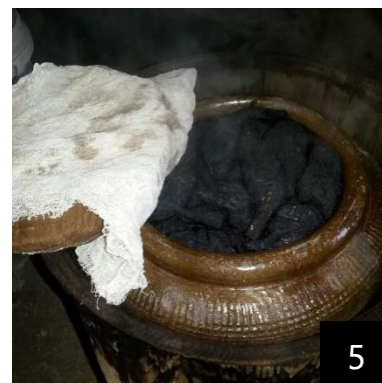
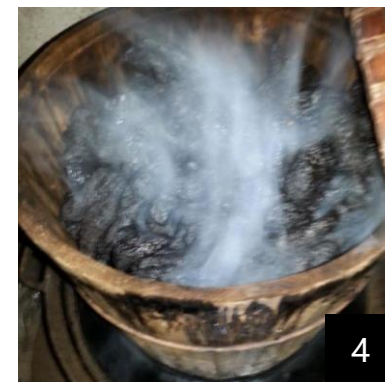
04.
2

中药炮制

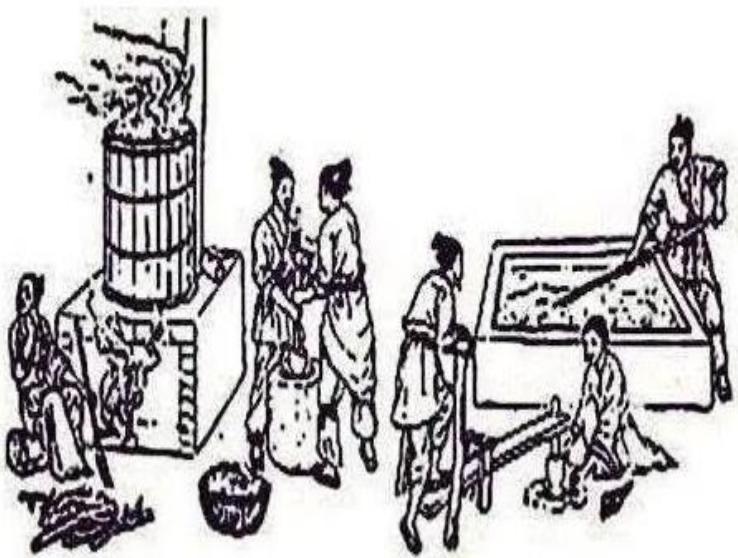
CHAPTER

九蒸九晒熟地黄制作工艺

- **第一天：**生地黄洗净外表泥沙，晒干备用，放入砂仁、陈皮、黄酒拌匀，再装罐闷上12小时。目的就是使辅助材料充分渗透进主料地黄内部。
- **第二天：**上甑加水蒸24小时
- **第三天：**晒干、放晾
- **第四天：**入甑直接蒸八小时
- **第五天：**取出再晒干，放凉。
- 如此反复八次，也就是蒸一天晒一天，反复16天，加上最开始一天，现在一共17天。
- **第十八天：**黄酒、砂仁、陈皮拌入熟地黄封罐闷蒸，蒸制到外表油润，断面乌黑油亮即可。取出晾晒干。



炮制虽繁必不敢省人工， 品味虽贵必不敢减物力！



- 九蒸九晒一般用来炮制比较珍贵的药材，以补品为主。
- 最有代表性“四大九蒸货”：**地黄、黄精、何首乌和槐角**。
- 大黄、黑芝麻、干姜等也经常采用九蒸九晒工艺炮制。

一种中药材的传统炮制方法，指采用蒸法和晒法反复炮制中药材的方法，**主要目的是为了纠偏药材药性或增加药物成分，减少毒性成分，增强疗效、改变归经、利于贮存、消灭病菌等目的。**

研发背景——九蒸九晒黄精

单服九蒸九曝食之，驻颜断谷。补诸虚，止寒热，填精髓。——《本草纲目》

若生则刺人咽喉，曝使干，不尔朽坏。——《食疗本草》

汁尽色黑，当光黑如漆，味甘如饴糖。——《本草图经》



- ◆ 生黄精中含有的黏液质在一定程度上会刺激咽喉，通过反复的蒸晒，黏液质会发生分解，达到减毒目的。
- ◆ 黄精九蒸九晒后，有效成分累积，可补脾润肺、温补肾阳，增强黄精的药效。
- ◆ 九蒸九晒早期会启动黄精的抗干旱胁迫机制，促进其次生代谢产物（黄酮类、苷类等）的合成，提高其有效物质的含量，多糖逐渐分解成人体易于吸收的小分子糖类，达到增效目的。

九蒸九制工艺现状



01

纯手工制作，劳动密集：耗费人工，一般需要3~5个人；

02

生产周期很长：生产周期一般需要两周以上；

03

周期无法把控：通过太阳进行晒干，靠天吃饭，如果碰到阴雨天气将导致无法进行烘干处理；

04

卫生条件差：露天晒干导致与空气中的污染物直接接触；

05

产品缺乏稳定性：工艺过程完全通过经验判断，工艺参数无法进行精细控制，同时受到老药工的身体、精神状态影响，导致批次产品之间的质量存在很大的差异；

师承建樟，传承古法，智慧学习，工艺精准！！

九蒸九制智能一体设备与传统设备特点对比

	九蒸九制一体化设备	传统设备
布料方式	分层布料	堆料
能耗	低（能耗降低75%以上）	高
生产周期	传统工艺周期的一半	传统工艺周期
工艺参数控制	精准控制	经验控制
自动化程度	一键启动	纯手工操作
产品质量	稳定	不稳定
工艺集成	一体化集成	润、蒸、收汁、烘分开操作
设备材质	食品级不锈钢	不锈钢
卫生条件	封闭环境	开放环境
烘干方式	古法干制&拟态光照	光照



国内首创！！

新疆与哈萨克斯坦天然植物药材绿色炮技术与装备

上海合作组织科技协作项目

研究内容

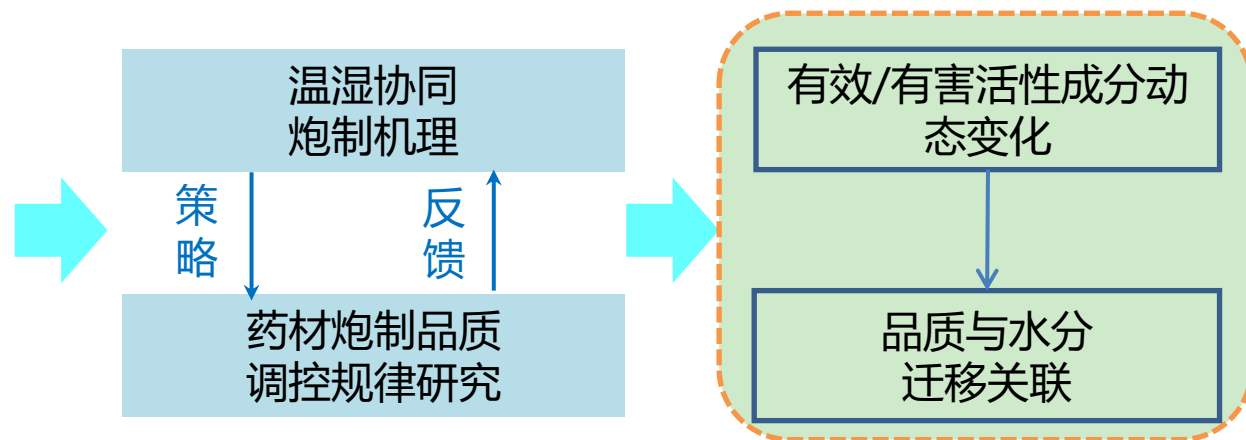
- 药材炮制过程热质传递规律研究
- 药材炮制过程有效活性成分动态变化规律研究

目标

- 阐明药材炮制特性及品质调控机理
- 为装备研发提供工艺基础

难点

药材炮制特性及活性成分保持机理

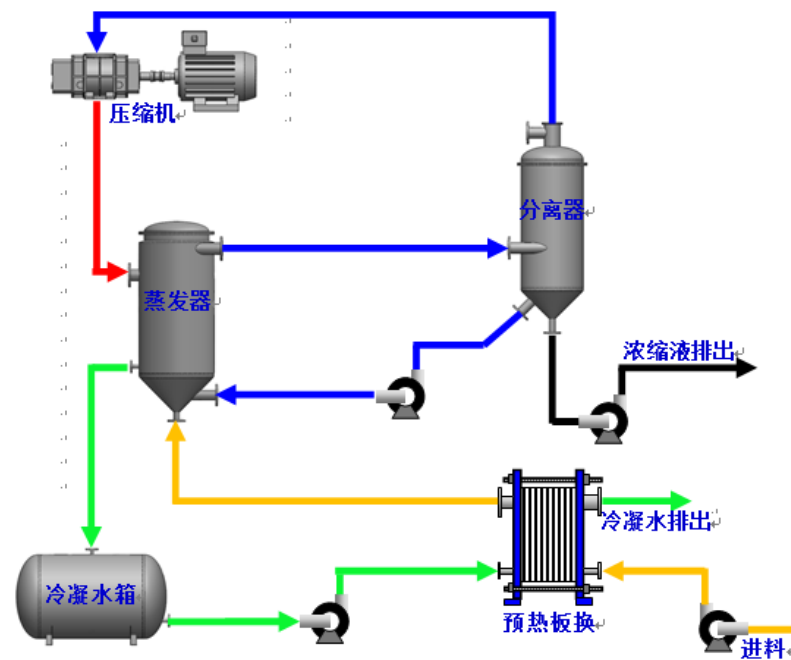


05

CHAPTER

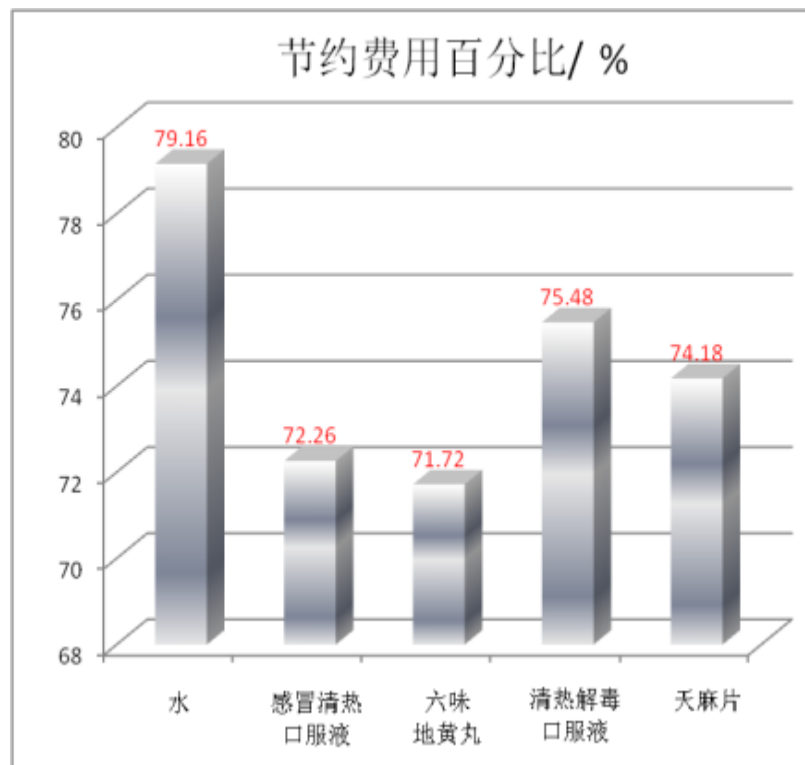
直接增焓

中科院河南转移转化中心项目

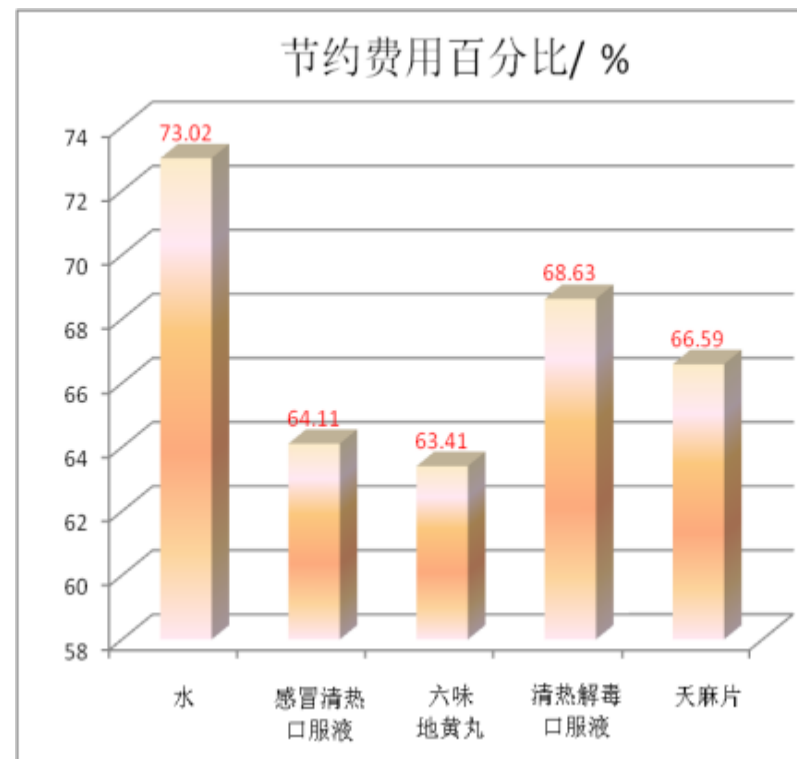


浓缩工艺控制精准，保证药效，降低能耗50%

中药节能浓缩节能经济性分析



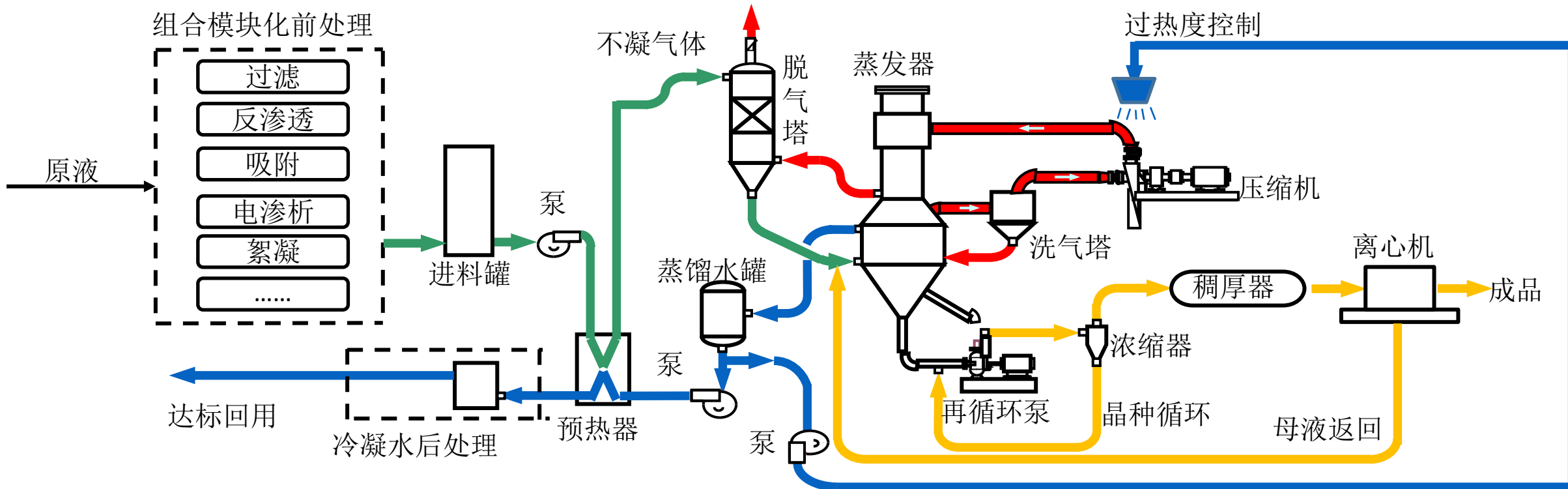
MVR系统相对于单效系统



MVR系统相对于两效系统

按：蒸汽250元/吨，电价1元/度。

国家重大科技专项：工艺工质增焓+高浓含盐有机废水处理及资源化



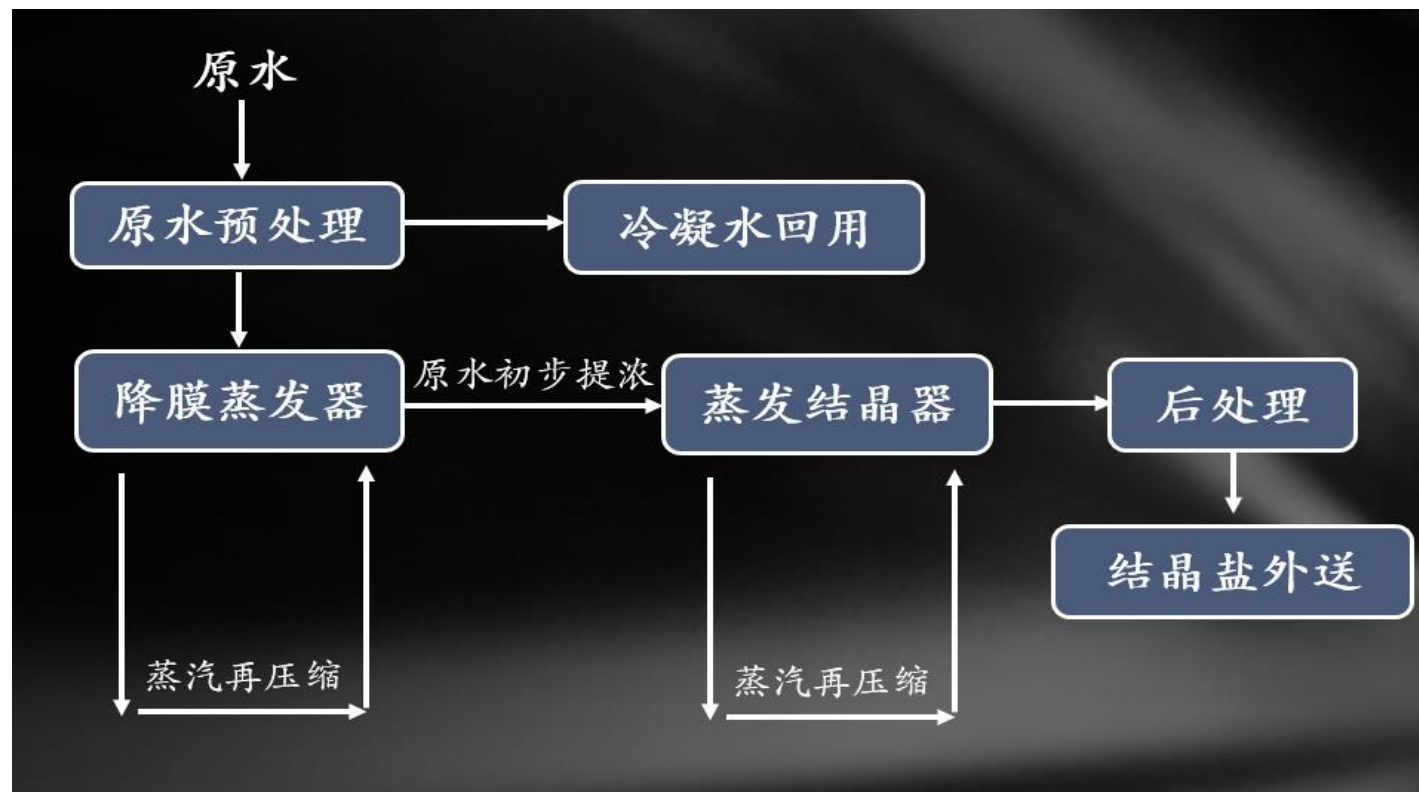
创新点：研发以工艺工质增焓**蒸发浓缩技术**为基础，以高浓度含盐有机废水**前、后处理**为支撑的废水资源化与趋零排放处理技术及工艺。

关键技术突破：

- ① 增焓系统技术：水蒸汽压缩机、蒸汽高效洗涤、过热度控制
- ② 介稳晶种防垢
- ③ 模块化增焓蒸发+前、后处理工艺

国家重大科技专项：农药废水处理及资源化

关键技术突破：**两级蒸汽再压缩，降低能耗**



山东xx科技有限公司农药废水处理

- ◆ 废水含盐8%，水量 100 m³/d，COD 为2,000 mg/L
- ◆ **冷凝水达标回用**，结晶杂盐作危废处理



国家重点研发计划：核素废水热法高效分离



核素废水热法高效分离。

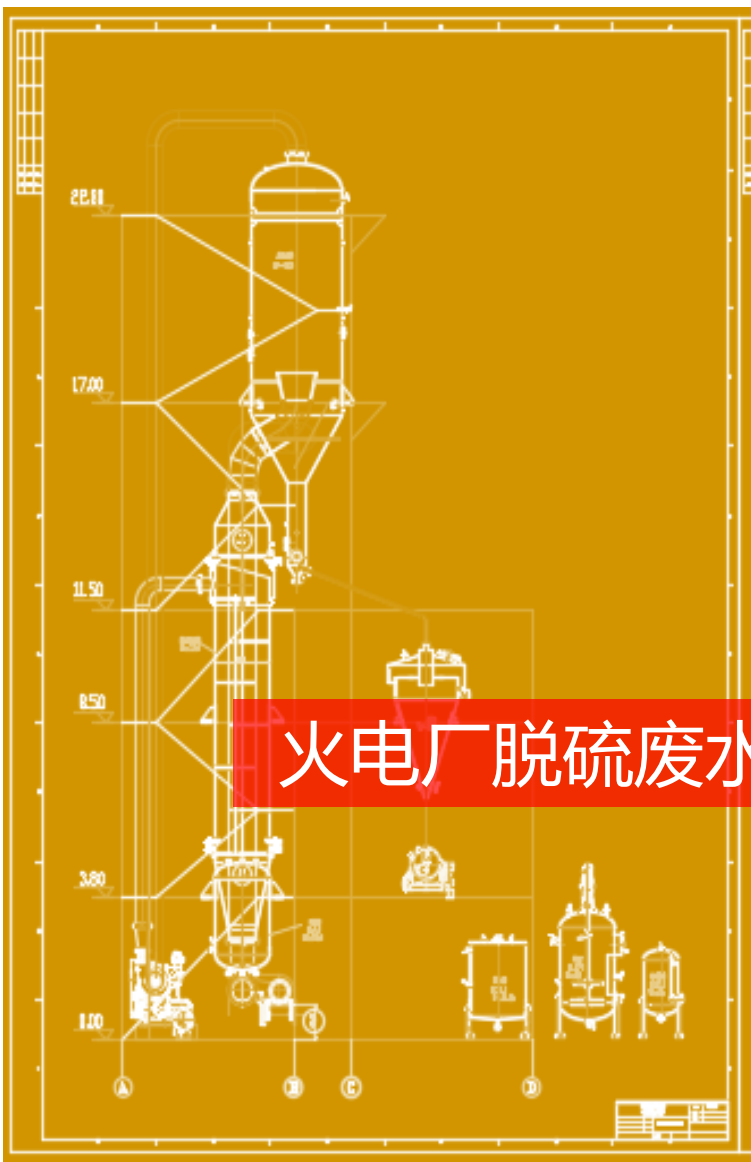
实现装置大幅节能（50%以上），去污因子大幅提升（超越立项标准50倍以上）。采用增焓浓缩技术对核电站事故废水核素离子高效富集，完成一/二期项目。



热源塔防冻液高效增焓浓缩再生（央企）。
 项目特色：实现装置大幅节能（50%以上），大幅降低设备尺寸和启动余热时间，实现装置运行全自动化（一键启动模式）。
 项目描述：采用增焓浓缩技术对热源塔防冻液再生，完成一/二期项目。
 产品评价：国内首例。

热源塔防冻液稀释溶液浓缩再生装备项目典型案例

脱硫废水趋零排放



项目名称：脱硫废水蒸发脱盐处置

处理量：4317kg/H

处理要求：脱硫废水零排放

主要成分：氯化钠/硫酸钠

蒸发量：4080kg/H

蒸发温度：90℃

蒸发工艺：乏汽压缩增焓蒸发

结晶工艺：热法结晶+离心分离

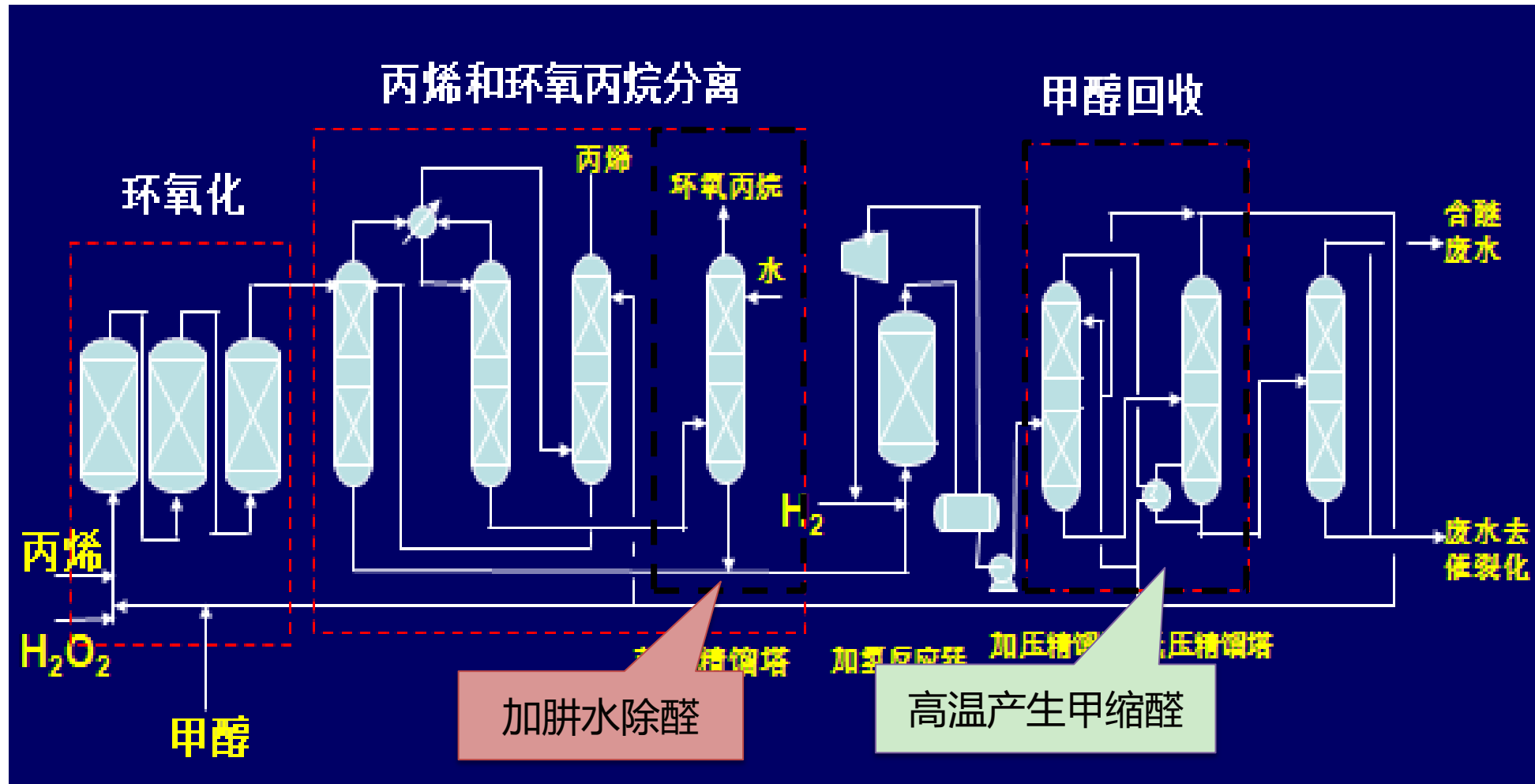
循环型式：强制外循环

火电厂脱硫废水趋零排放蒸发脱盐处置项目典型案例

特点：采用内循环机封循环水，专业防堵设计，重力排盐设计及压缩机保护设计等。

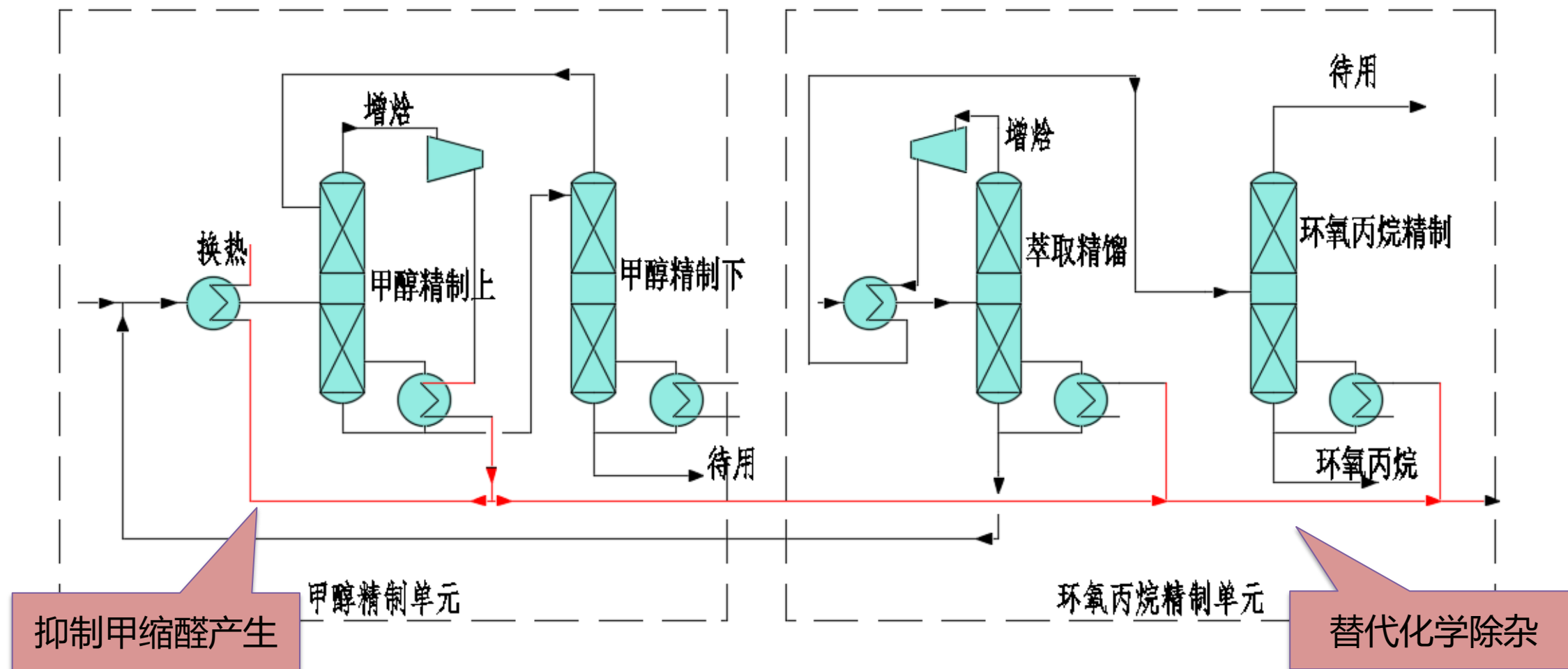
装置能耗：58kwh/蒸发吨水，相比传统三效设备，节能60%以上。

化工工艺：环氧丙烷/甲醇精制项目

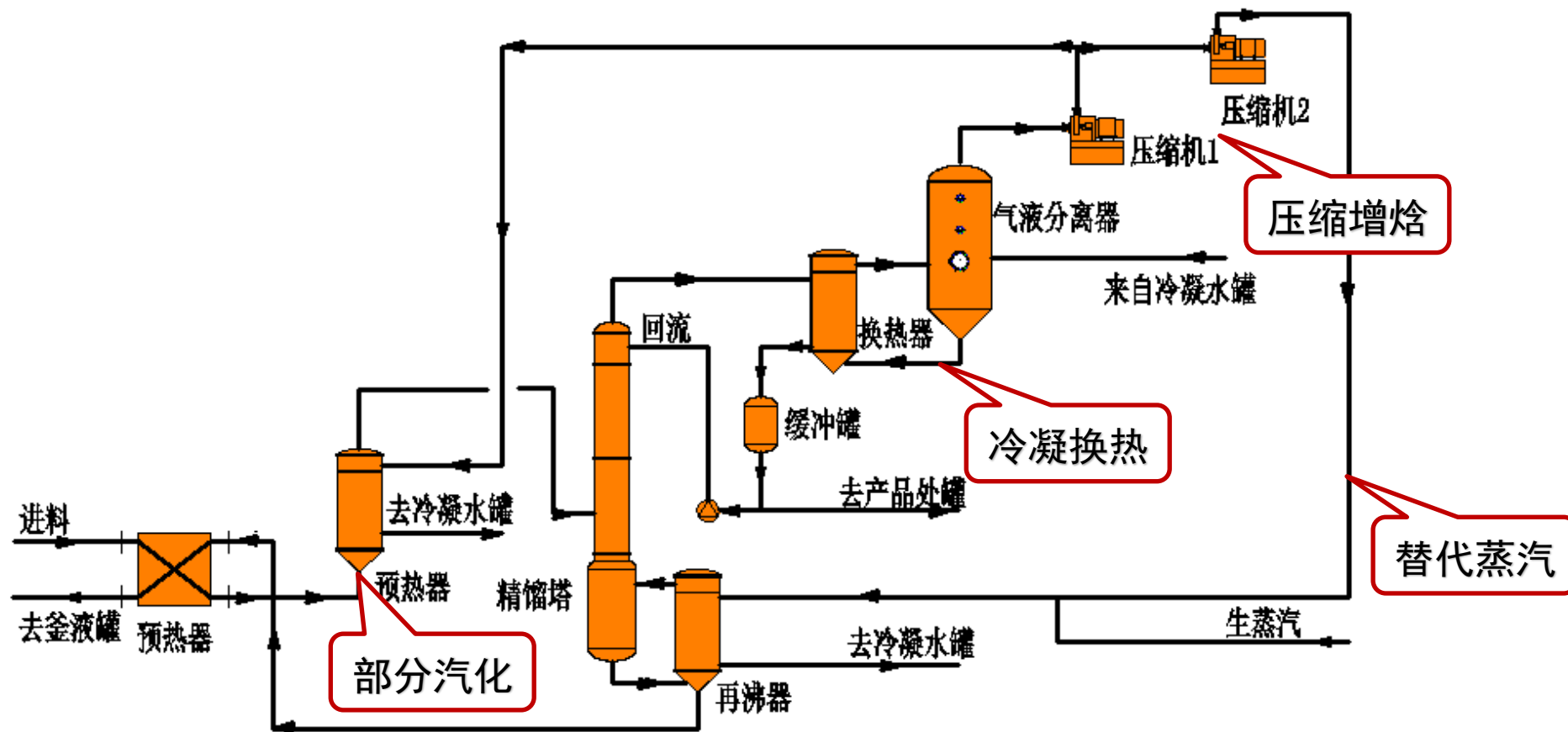


原有环氧丙烷/甲醇精制项目工艺流程（十万吨）

环化工工艺：氧丙烷/甲醇精制项目

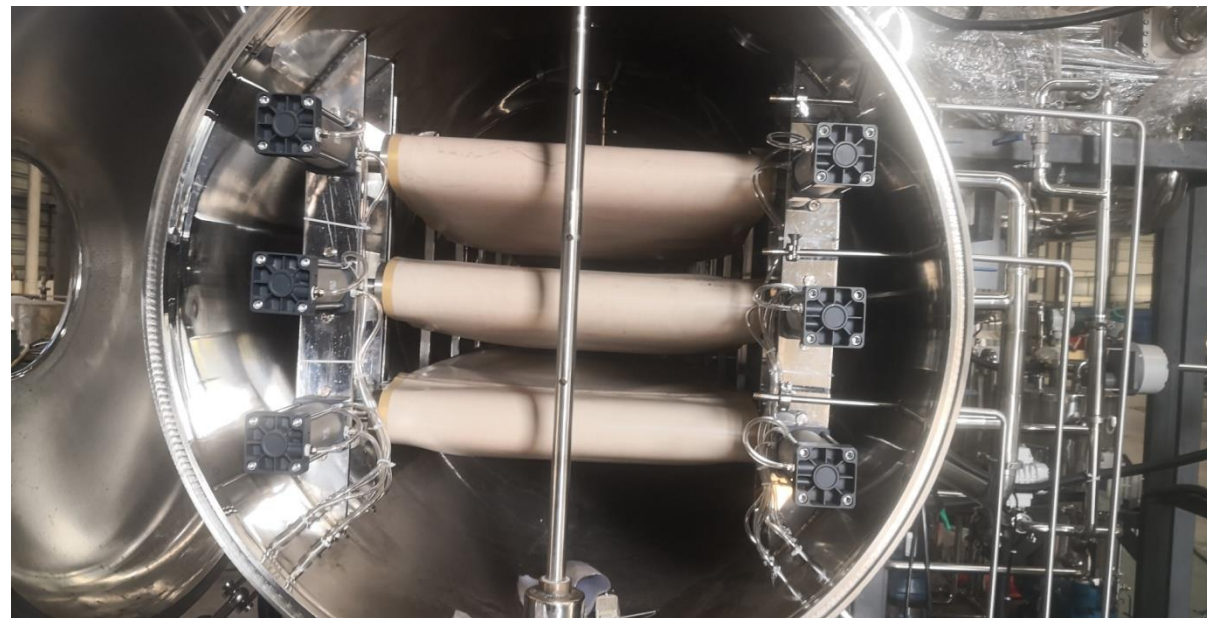
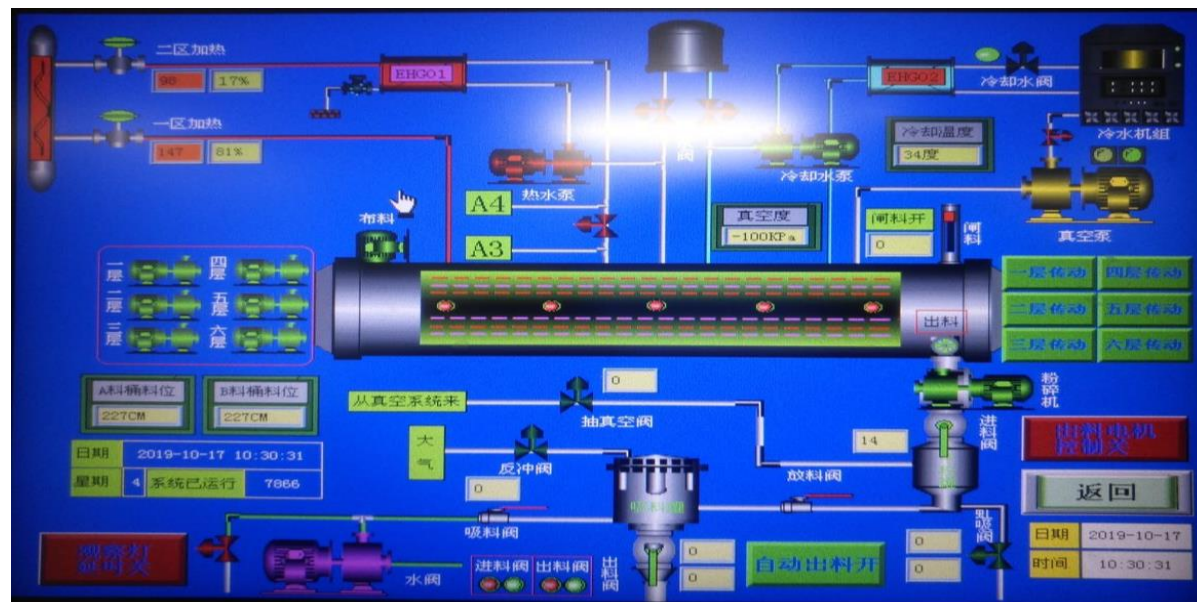


改进后环氧丙烷/甲醇精制项目工艺



改造后乙醇回收流程

废水酒精浓度降低50%，能耗下降51.3%，纯化成本降低

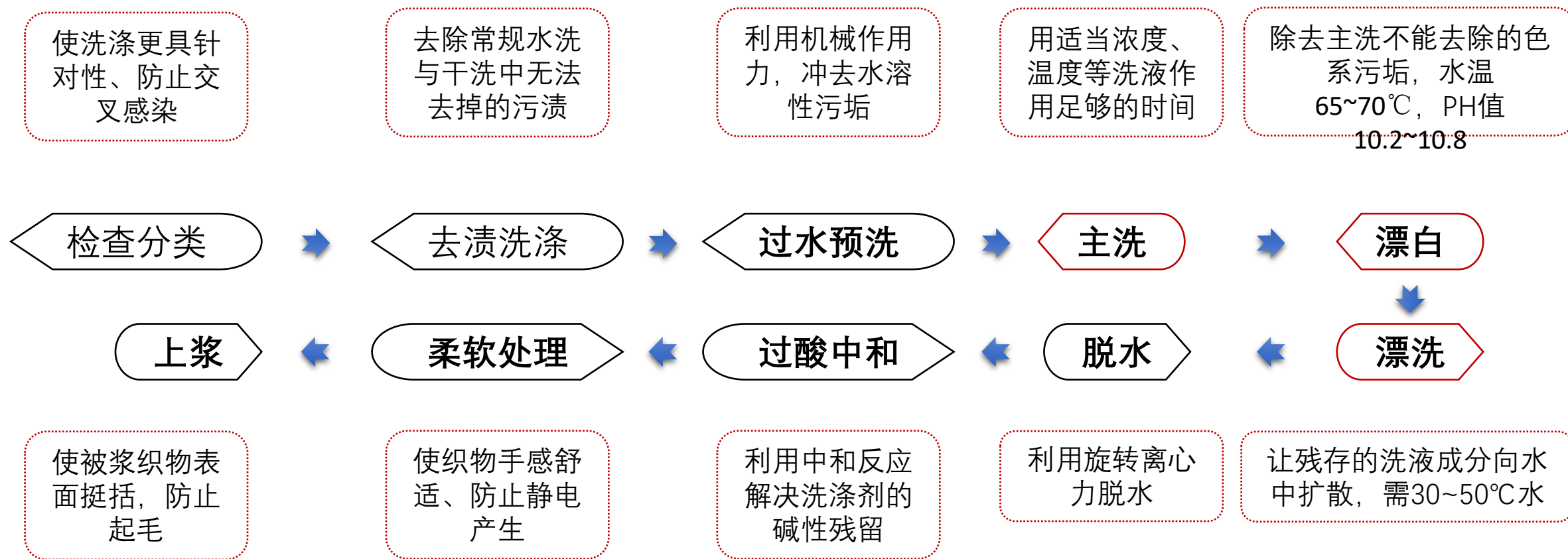


06

CHAPTER

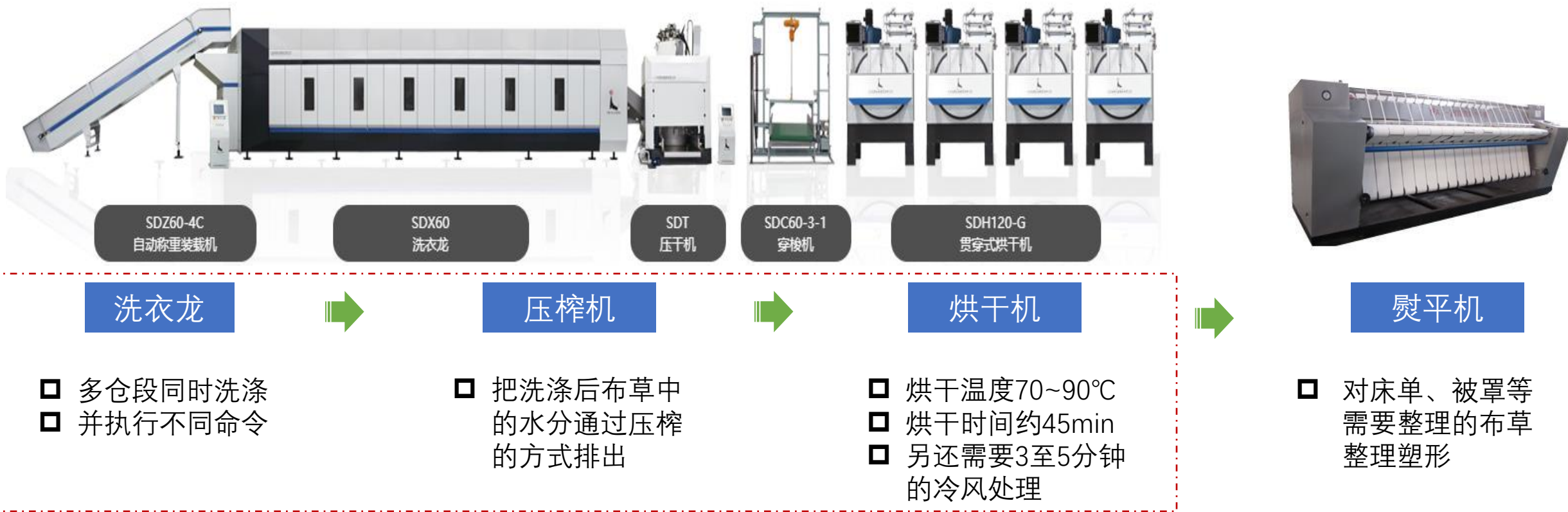
CO₂
制冷热泵

项目背景—现代酒店布草洗涤步骤



热能的损耗和浪费主要集中在主洗、漂白、漂洗三个阶段

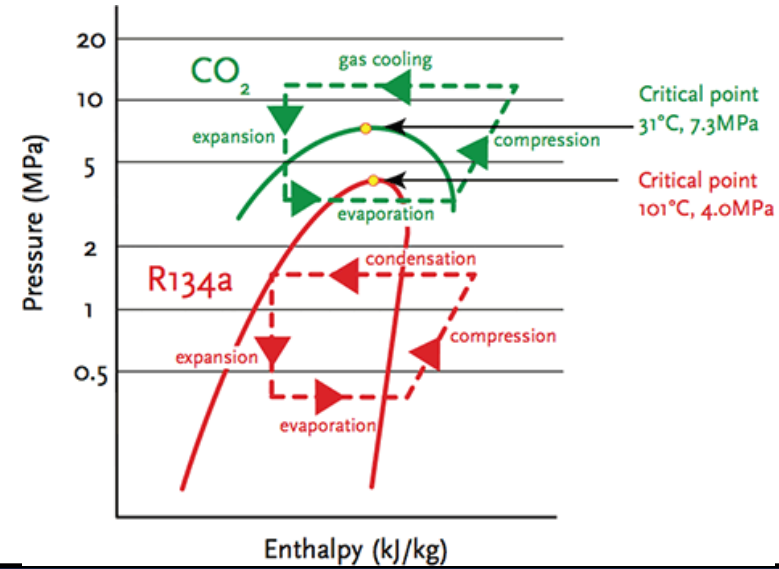
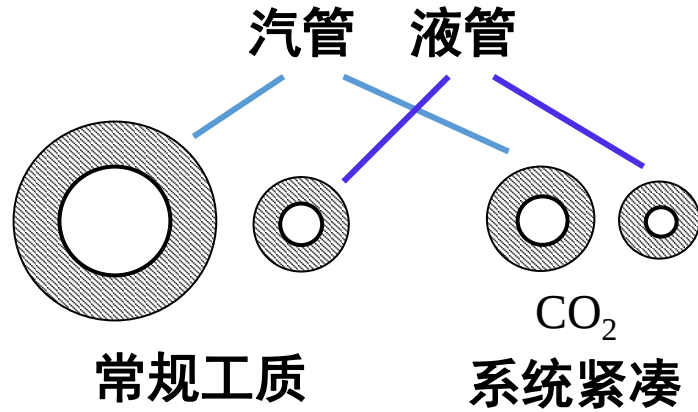
项目背景—洗衣厂布草洗烘工序



- 加热过程仍采用蒸汽加热，能量利用率低、污染环境
- 洗涤过程用水直接排放，热量没有回收

CO2热泵解决方案

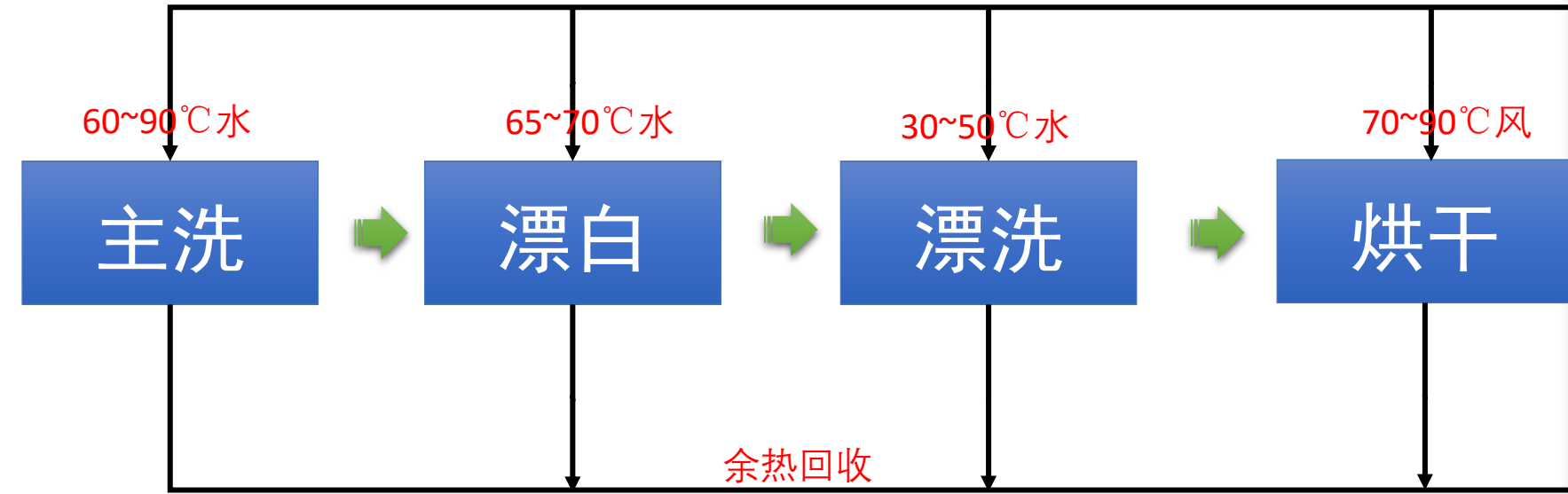
CO₂热泵优势



参数	R22	R32	R134a	R407C	R290	CO ₂
ODP	0.055	0	0	0	0	0
GWP	1810	675	1430	1800	~20	1
临界温度/°C	96	78.41	101.7	87.3	96.7	31.1
临界压力/MPa	4.974	5.8143	4.055	4.65	4.25	7.372
单位容积制冷量	4344	—	2860	2947	3870	22600
可燃性	不可燃	微燃	不可燃	不可燃	易燃	不可燃

能源综合利用方案

■ 改变洗衣龙的加热方式

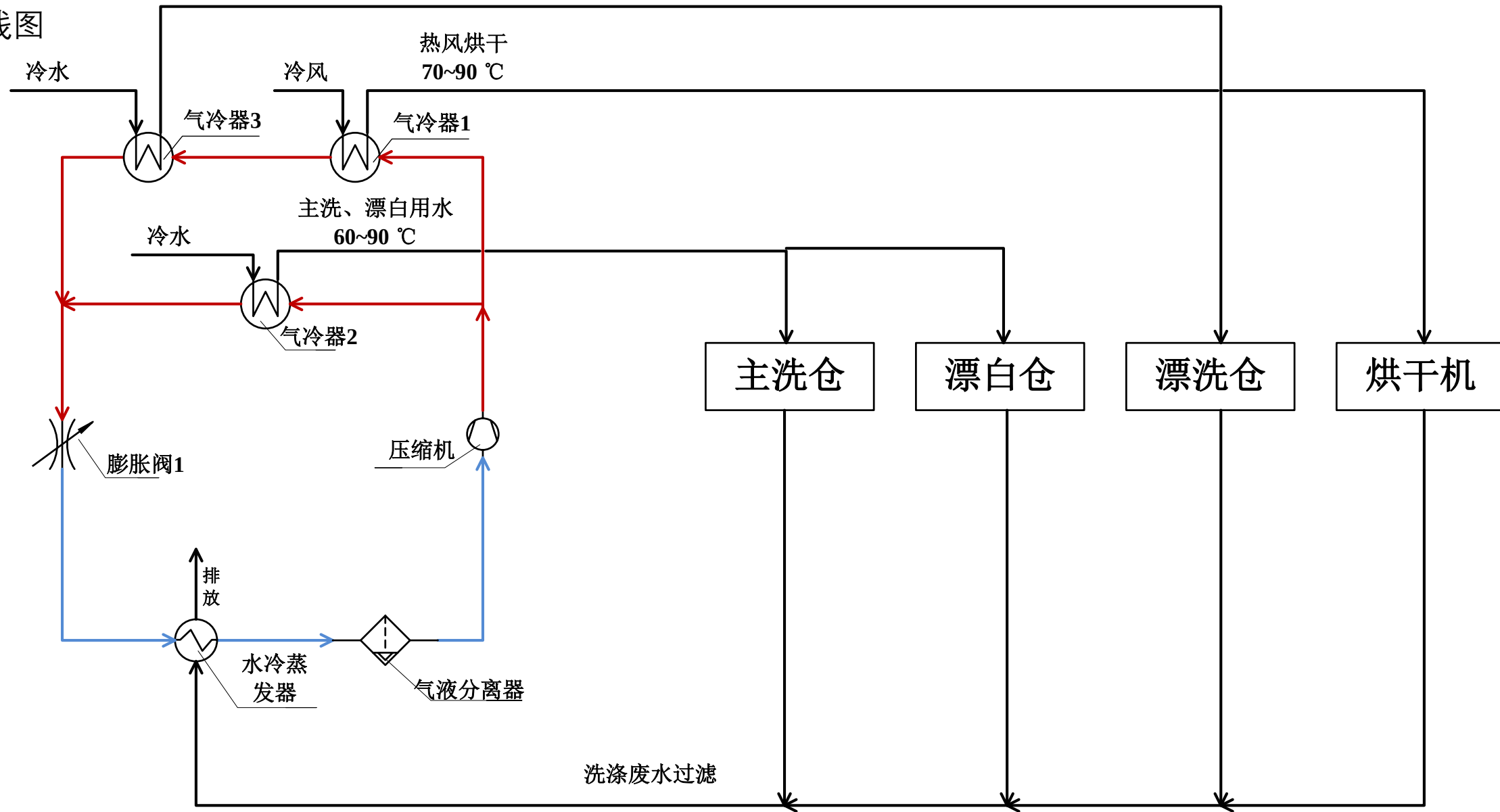


□ 摒弃传统蒸汽加热方式的优点

- 减少洗衣龙的机械结构，降低机械成本
- 采用直热式CO₂热泵热水系统，缩短灌水时间，降低时间成本
- 摒弃蒸汽发生装置，降低环境成本
- 建立废热回收系统，降低能源成本

能源综合利用方案

■ 技术路线图

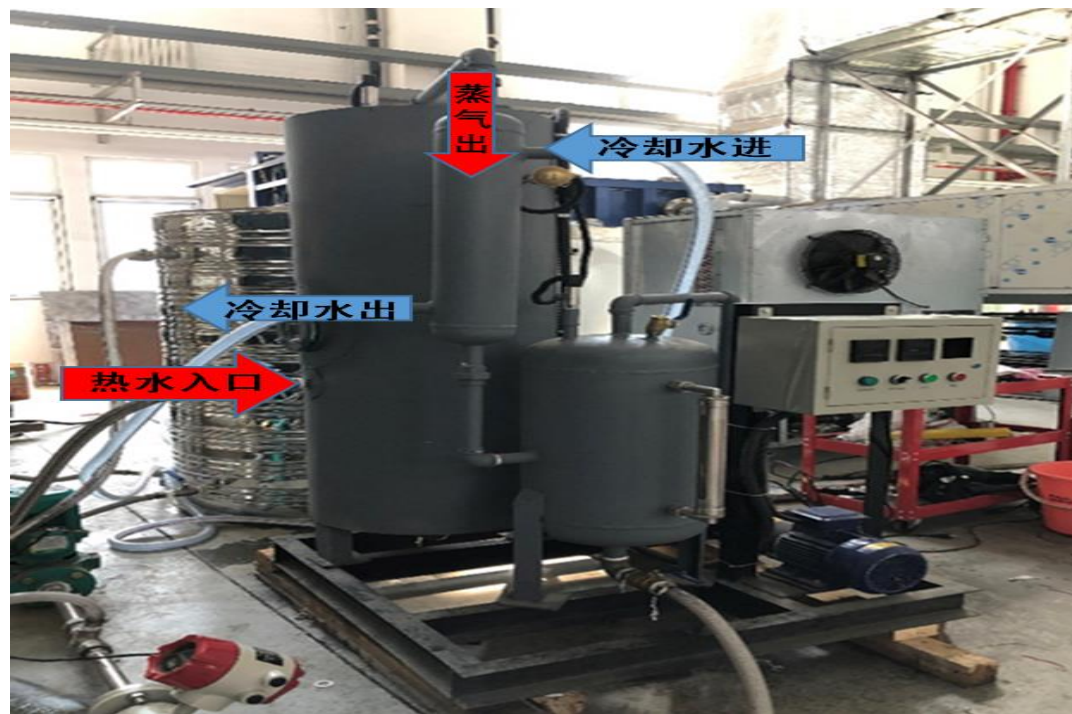


研究进展---高温热泵

➤ CO₂热泵蒸汽发生器



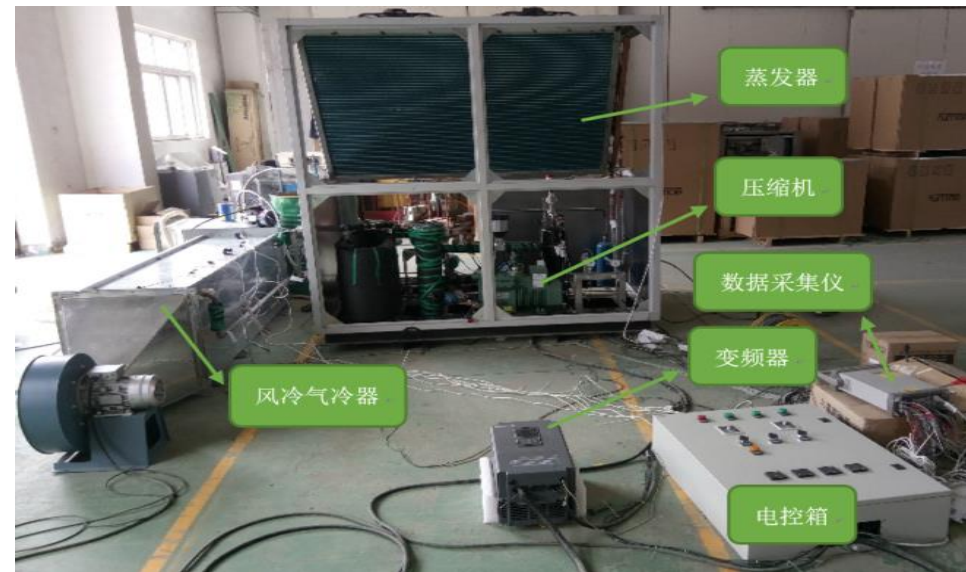
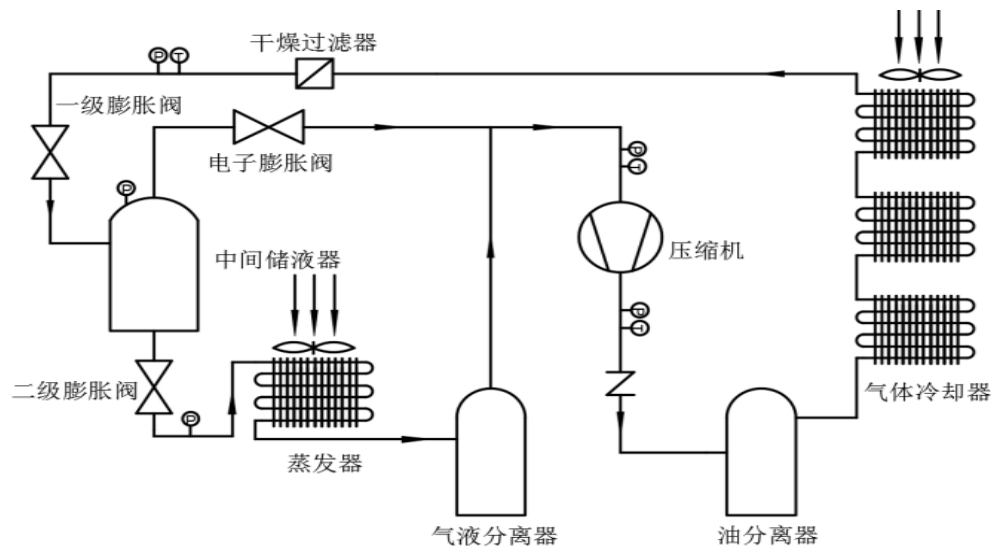
➤ CO₂热水系统



- ✓ 针对酒店、食品、布草行业高温消毒、熨烫等蒸汽的需求，代替传统燃煤锅炉产生蒸汽
- ✓ 提高蒸气发生器效率效率，提高单位能耗蒸气产量，产生100℃以上常压蒸汽
- ✓ 通过水蒸汽压缩机（小流量采用罗茨风机）增温增压产生高压蒸汽

研究进展---高温热泵

➤ CO₂干燥系统原理及实物图



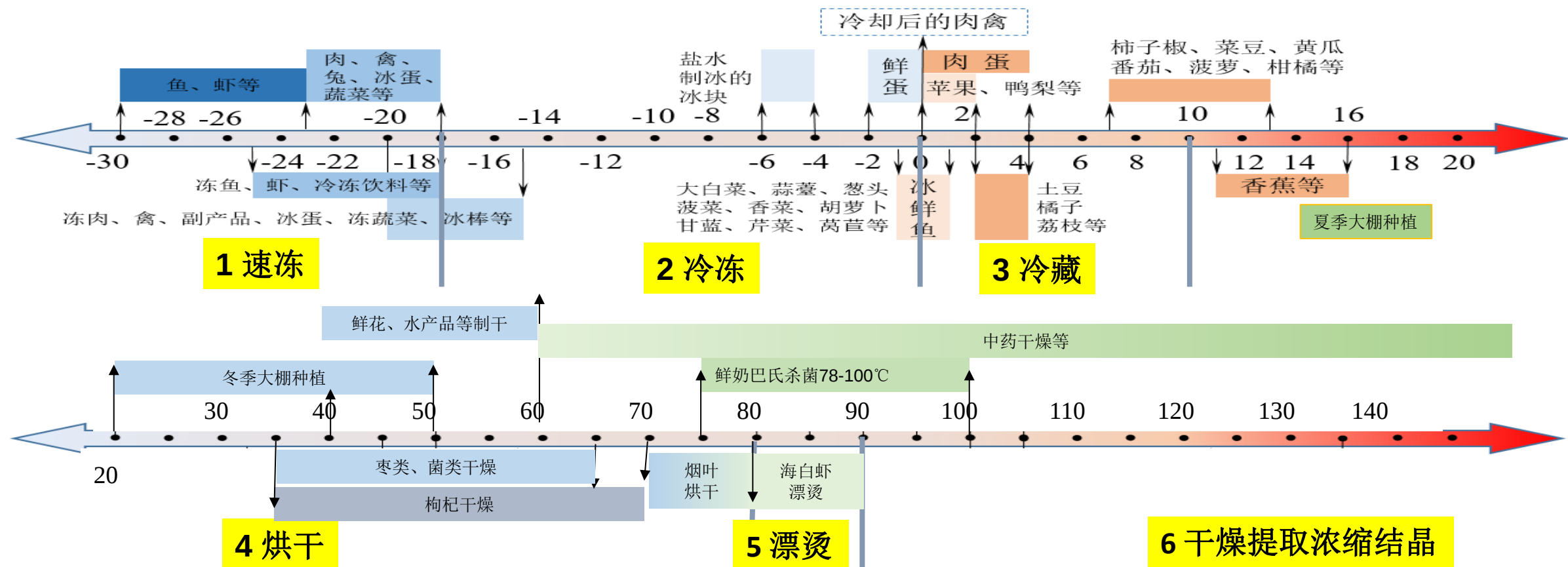
- ✓ 蒸发温度7.76 °C，高压侧压力125 Bar左右时，气冷器进口温度115°C，出口温度53°C，进口风温15 °C，100 °C热风产量为1295 m³/h，COP为2.2
- ✓ 蒸发温度5.2 °C，高压侧压力108 Bar左右时，气冷器进口温度106°C，出口温度42°C，进口风温15 °C，88.5 °C热风产量为1707 m³/h，COP为2.72

07

CHAPTER

小结展望

源荷匹配，温度对口，增烺利用



除鱼、虾等冻结间需-23 ~ -30 °C以及部分蔬菜水果等需7 ~ 16 °C的工艺需求外，绝大多数冷却冷藏间温度需求在0 °C左右，冷冻冷藏间温度需求在-18 °C左右。常用的烘干温度通常在30 ~ 80 °C，漂烫、消毒等温度在80 ~ 100 °C，干燥提取浓缩温区60 ~ 150 °C。

谢谢各位专家



张振涛

13911277496, zzt@mail.ipc.ac.cn

微信15810425819