



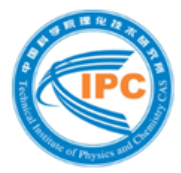
# 热泵干燥技术典型应用分析

报告人：杨鲁伟 研究员

单 位：中国科学院理化技术研究所

热力过程节能技术北京市重点实验室

2021年4月8日



# 主要内容

1

热泵干燥技术介绍

2

串联除湿热泵干燥技术

3

封闭式热泵干燥技术

4

工厂化热泵干燥技术

5

小结



# 一、发展工业热泵干燥技术的背景与机遇

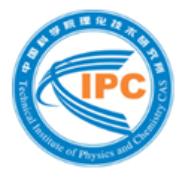
## 传统干燥的弊端

- **能源现状**（多煤、少油、少气，电力过剩）
- **效率低**（热风炉效率约55%、蒸发吨水需2吨以上蒸汽、电热效率低）
- **环境污染严重**（农产品干燥多数采用直排，工业尾气处理成本高，效果差）
- **干燥质量不稳定**（智能化程度低，受四季环境温、湿度影响明显）

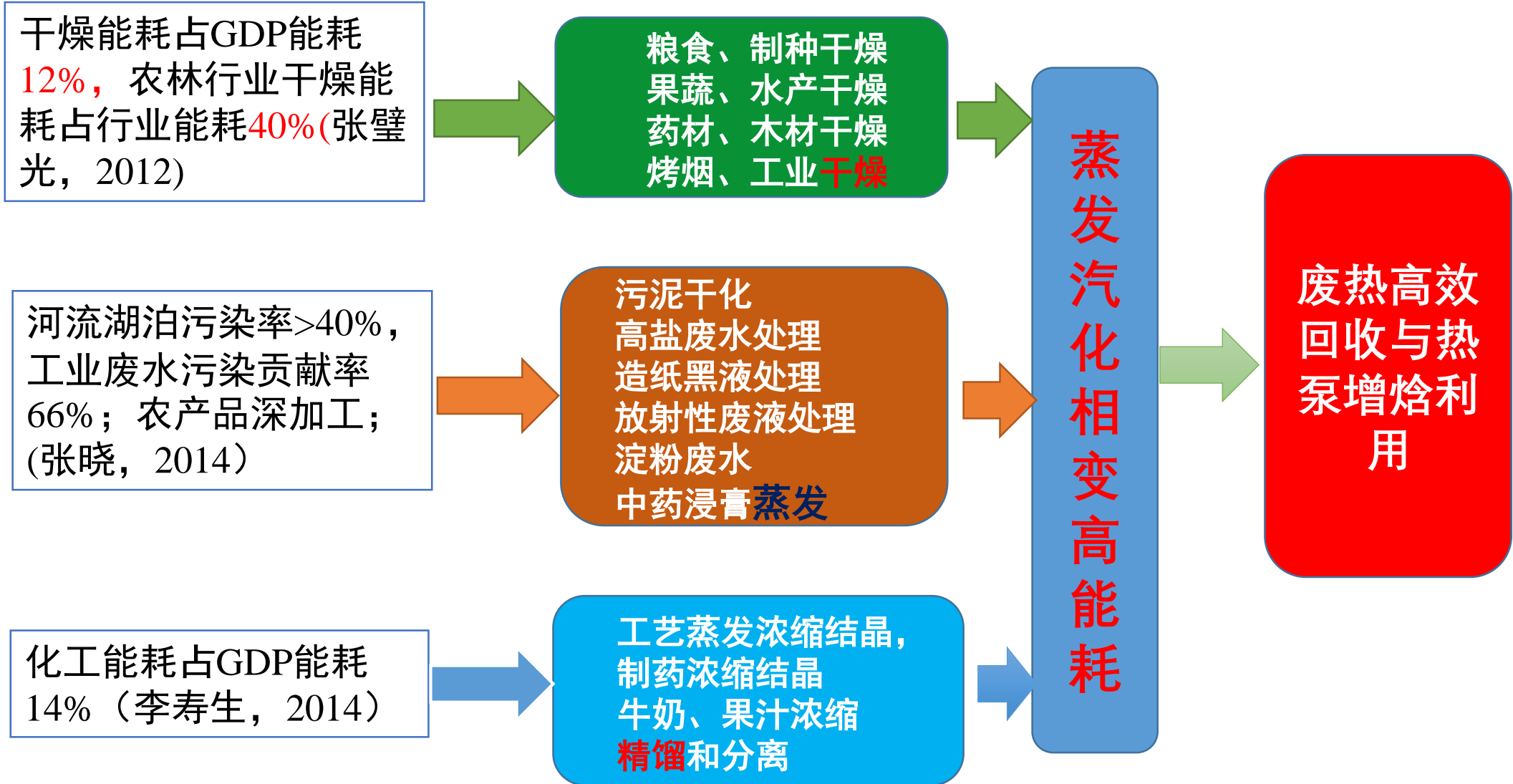
**矛盾**

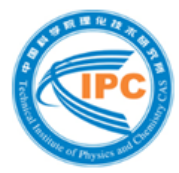
**国家政策、行业发展**

**节能减排、减工降本、提质增效**



# 工业热泵节能背景意义





# 热泵干燥的优势

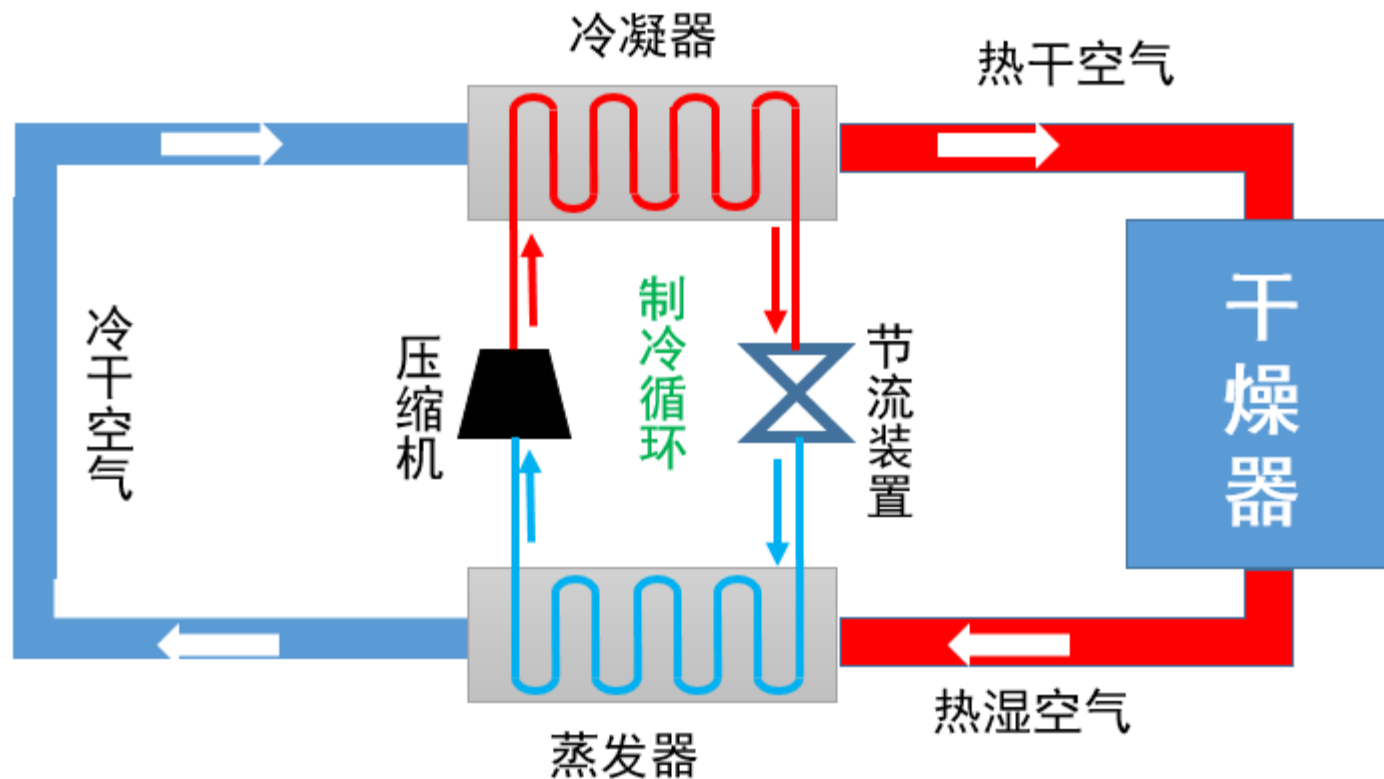
干燥方法	初投资	运行费用	干燥质量	干燥时间	制造复杂性	干燥效率 (kWh/kgwater)
自然风干	1	1	1	5	1	0
电热、锅炉热风干燥	2	2	2	3	2	1.2 (热或电)
冷冻干燥	5	5	5	3	5	3.0 (电)
真空干燥	3	4	4	2	4	2.0 (电)
微波干燥	3	3	2	2	4	0.8 (电)
<b>热泵干燥</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>0.3 (电)</b>
说明	数字大则初投资大	数字大则运行高	数字大则干燥质量越好	数字大则干燥时间越长	数字大则制造约复杂	<b>数字大则耗能大</b>

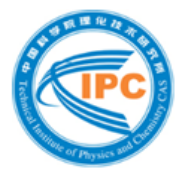
热泵干燥与上述常规干燥方法相比，质量相对好，投资成本相对有优势。



# 除湿干燥技术原理

运行过程中，热干空气进入干燥室内吸收物料水分后，变成热湿空气，**经过蒸发器逐级降温除湿后**，进入冷凝器加热后再次变为**热干空气**，并被送入干燥室进入下一个循环。





## ➤ 干燥工艺的复杂性

**预热：**夏天容易，北方冬天很麻烦（-20°C 升到 30°C，冰）

**杀青定色：**开水烫、蒸汽烫、微波加热，如茶叶

**除湿定色：**用的很多，含水率高，如烟叶

**熟化：**化学合成、转化，如烟叶变黄、柿饼变甜

**稳定脱水干燥：**保证烘干品相

**缓苏：**停停再烘，如粮食

**提香：**高温烘焙，如火腿

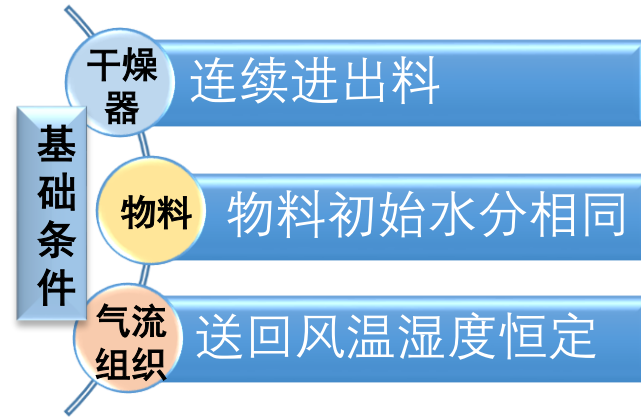
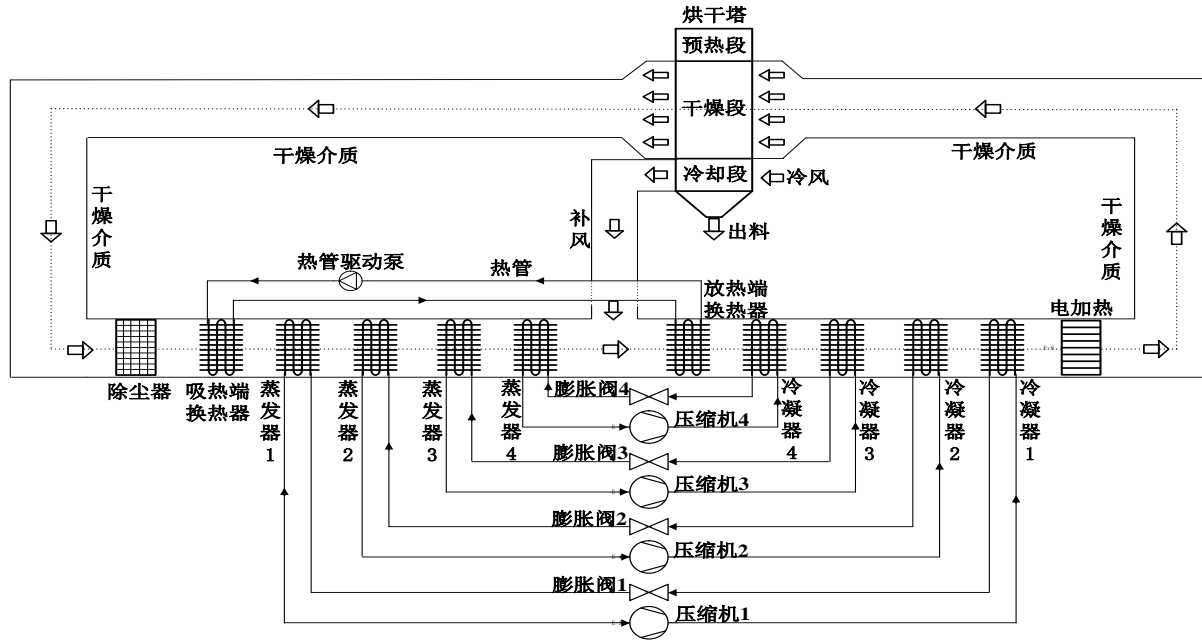
**风干：**低温干燥，如明胶、海参

**回潮：**重新加湿、防止破碎，如烟叶



# 二、特色技术—串联除湿热泵干燥技术

应用范围：广泛适用于农产品连续干燥和工业尾气近零排放处理



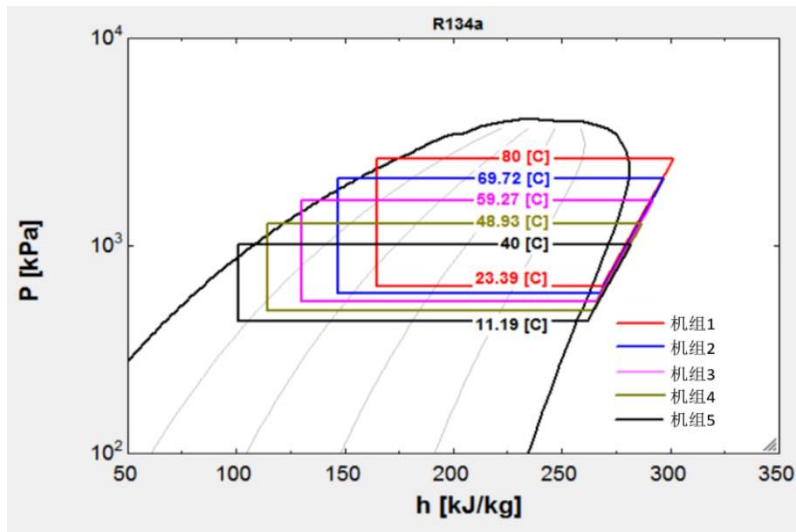
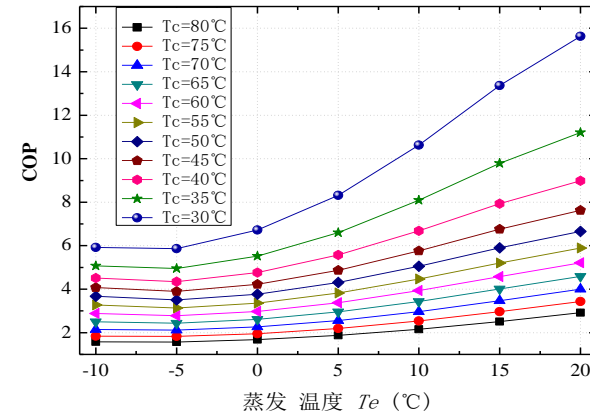
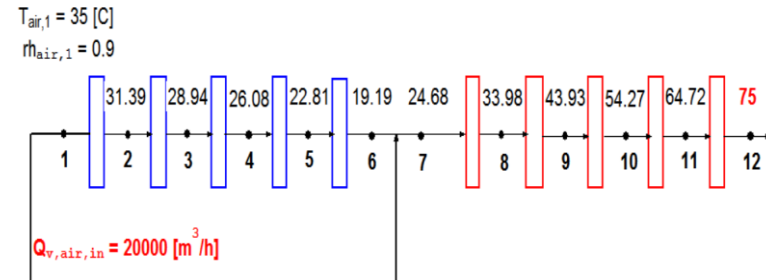
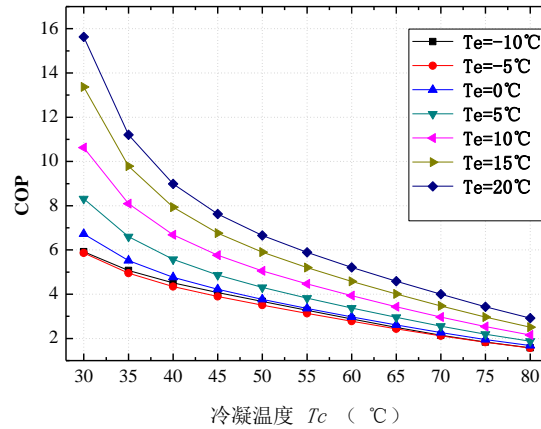
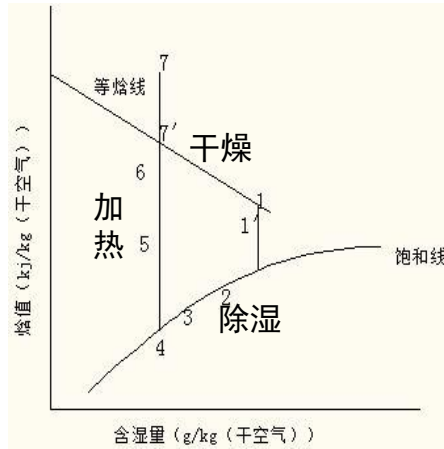
- 瓶颈与突破**
- **突破环境温度对热泵应用的限制，四季干燥过程稳定**
  - **热量利用率最大化，热泵能效COP达到5以上**
  - **高效转移热量（引入热管节能技术，转移10°C以上的热量）**
  - **全新除尘概念(蒸发段的湿法除尘+闭式循环)**

产业化装备30余台套，产值2000万元，申请项目2项，发明专利18项



# 创新一串联除湿热泵干燥技术

## 闭式除湿，干燥温度70°C



理论分析、建模

机组编号	蒸发温度 (°C)	冷凝温度 (°C)	压缩机电功率 (kW)	系统制热 COP
1	23.39	80.00	28.16	3.3
2	20.94	69.72	23.62	4.0
3	18.08	59.27	19.18	4.9
4	14.81	48.93	15.07	6.0
5	11.19	40.00	11.86	7.2

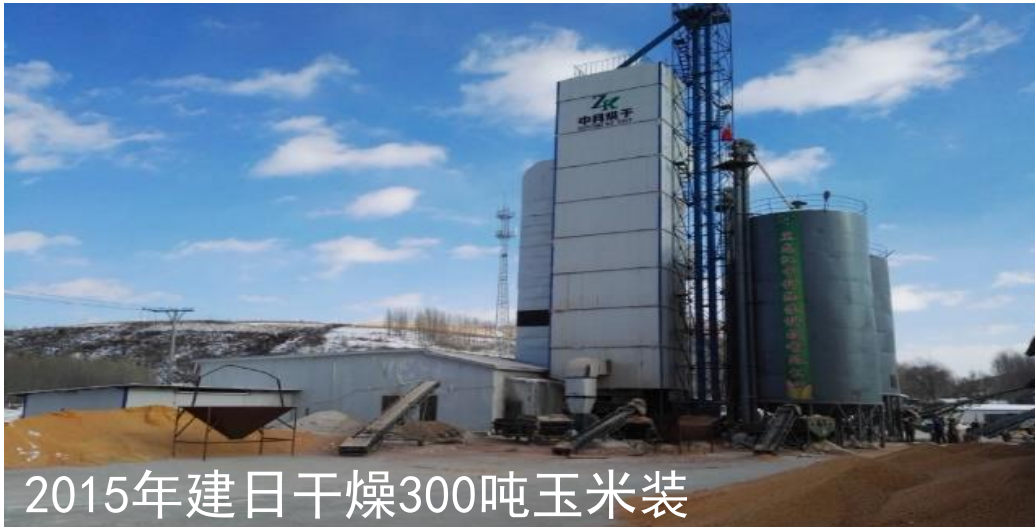
系统平均COP > 5.0



# 典型应用1：北方粮食干燥—塔式

## 解决的关键问题

- 1、低环温（-26 ~ -30°C）热泵工作效率
- 2、大型热泵在干燥领域应用的可行性



2015年建日干燥300吨玉米装

年度	建造形式	干燥类型	干燥量 (吨/天)	实施地点	数量	运行状况	用途
2014	新建	循环塔	50	穆棱粮库	1	良好	玉米
2015	新建	循环塔	300	穆棱个体	1	优良	玉米 大豆
2016	改造	循环塔	150	穆棱公司	1	优良	玉米
2017	新建	循环塔	100	滨州个体	1	良好	玉米 小麦
2018	新建	循环塔	100	安阳个体	1	良好	玉米 小麦

**鉴 评 意 见**

2017年1月12日，黑龙江省牡丹江市科技局在穆棱市组织有关专家，对中国科学院理化技术研究所和黑龙江中科热泵科技有限公司承担的“寒冷多变条件下热泵干燥玉米装备研制”项目进行了现场鉴评。专家组参观了生产现场，查阅了相关资料，听取了项目汇报，进行了质询，经充分讨论，形成如下意见：

- 项目提出了一种多台热泵系统串联分级除湿供热技术，采用封闭式多级蒸发器除湿技术，充分利用干燥塔排出的废热，有效提高各级蒸发侧的温度，保证了寒冷多变环境条件下热泵系统的高效运行，具有较高创新性。
- 应用多台热泵系统串联分级除湿供热干燥玉米时，冷凝温度可以达到75℃以上，循环干燥的空气温度可以达到70℃以上；智能化自控系统操作简便，控制准确。
- 经测算，热泵系统的COP高于5.0，与燃煤干燥系统相比，该热泵系统运行能耗降低40%以上；开发出糠皮收集系统，有效去除废气中的糠皮量，可达到98%。
- 该热泵烘干塔在黑龙江省穆棱市的示范应用中，能够满足玉米干燥生产需求，干燥质量明显优于传统燃煤干燥塔，节能减排效果和经济效益显著。该技术及装备在粮食干燥加工领域具有广阔的应用前景。

鉴评委员会一致同意通过鉴评。

建议进一步降低设备成本，争取相关部门支持和扶持，加大应用推广力度。

鉴评委员会主任 邵克哲

委员 王勇

委员 孙山友

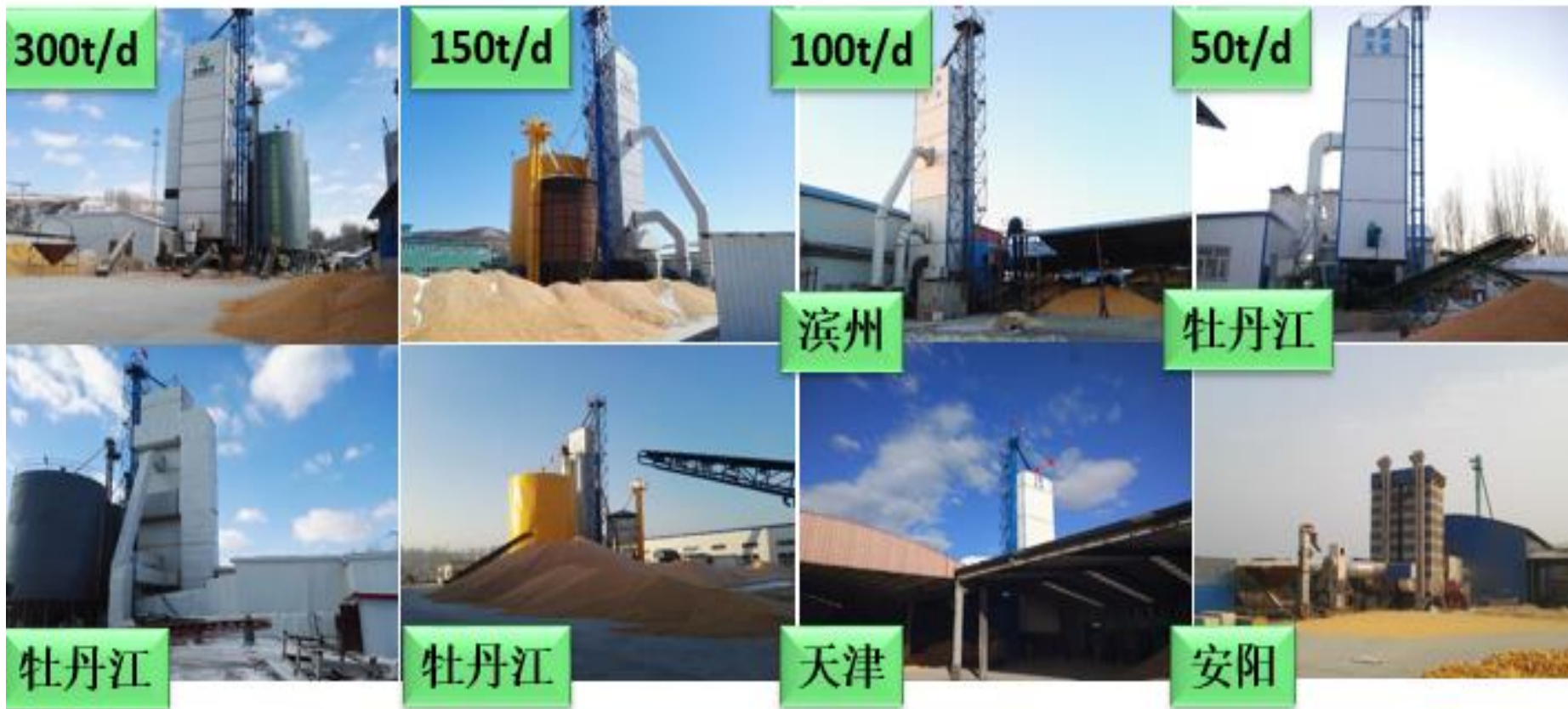
委员 邵宁忠

委员 刘靖

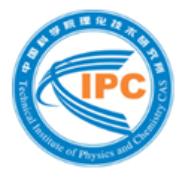
二〇一七年一月十二日

✓ 系统COP高于5.0

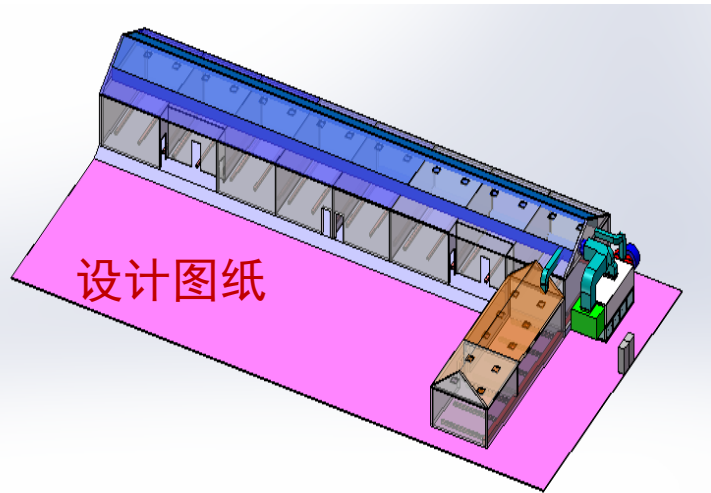
✓ 能耗降低40%



国内首套低环境温度 (-26 ~ -30°C) , (70 ~ 80°C) 高温烘干  
>500T/d工业最大规模粮食热泵烘干塔



# 典型应用2：西洋参烘干领域的应用一箱式

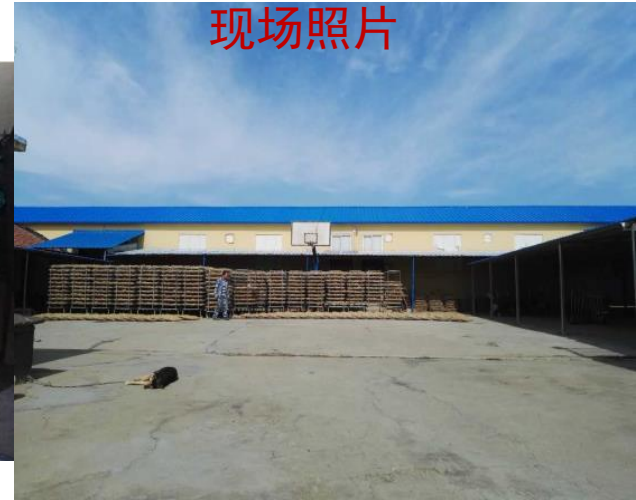


设计图纸

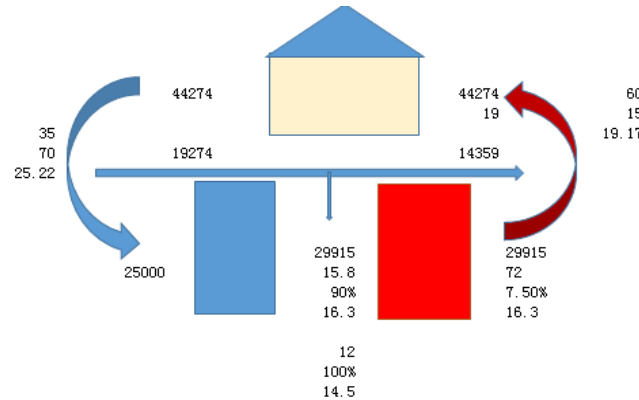
热泵主机



现场照片

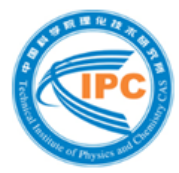


烤房内部



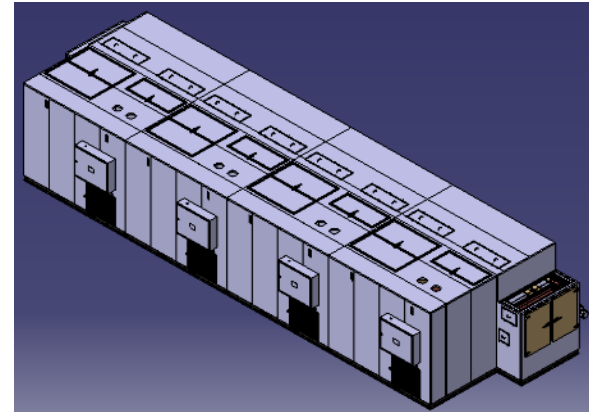
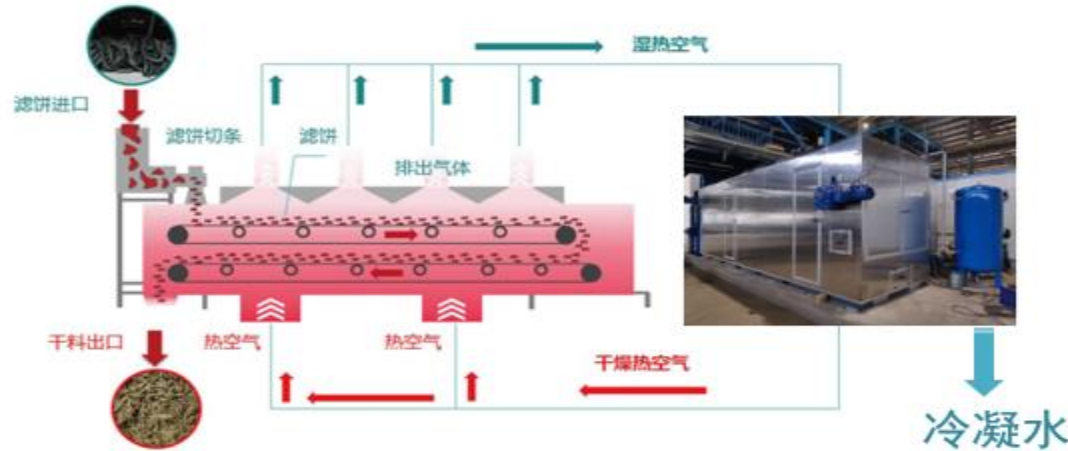
年度	建造形式	干燥类型	干燥量 (吨/批)	实施地点	数量	运行状况	用途
2017	改造	10连体房	50	荣成	1	优良	西洋参
2018	改造	14连体房	60	文登	1	—	西洋参
2018	改造	12连体房	50	荣成	1	—	西洋参

产品质量明显提升、比燃煤干燥**节能60%**，当年回收初投资



# 典型应用3：低温带式污泥干化—带式

较传统高温蒸汽干燥节能60%，而且没有外排气体。



## 两模块单元

- 污泥排料（干污泥）量测定：**490kg/h**，含水率**40%**
- 污泥处理（湿污泥）量测定：**850kg/h**，含水率**65%**
- 热泵干燥机组除水量测定：**360kg/h**
- 热泵干燥机组总耗电量测定：**99kW**
- 日处理湿污泥量测定：**10t/天**，含水率**85%**
- 热泵干燥机组除湿能耗比SMER：**3.6**

## 十模块单元

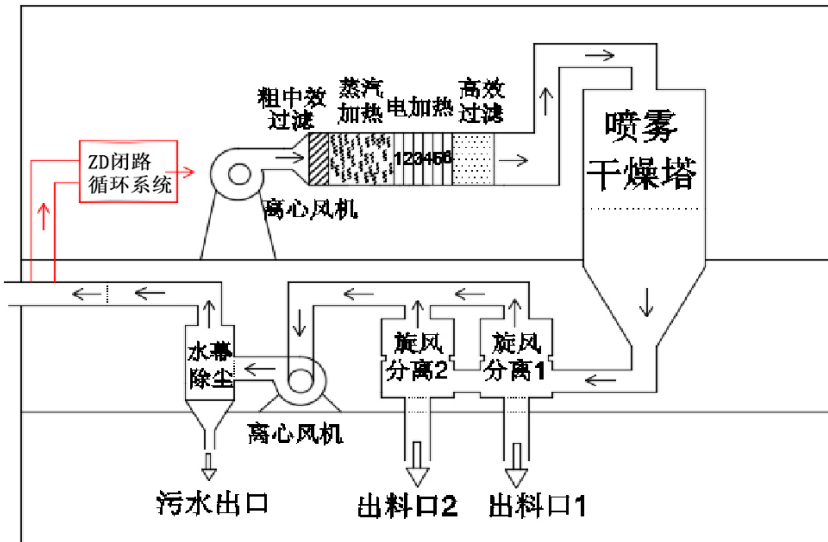
通过两模块单元实验测试结果来类比核算即将推广生产的十模块系列产品指标

- 1900kg/h**
- 500kW**
- 50t/天**
- 3.8**

模块多、漏热少、效率高

在烟台中节能污泥处理厂完成10吨的示范

# 典型应用4：工业干燥中尾气近零排放—喷雾

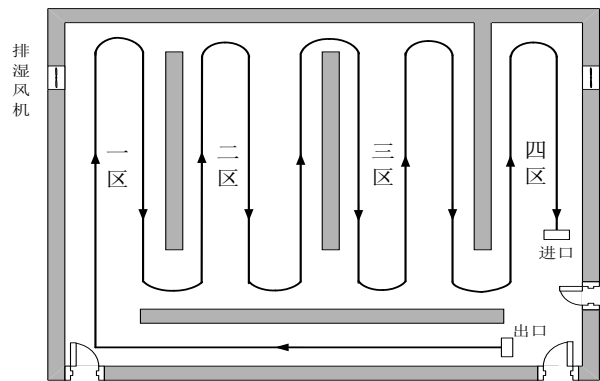


序号	项目	新系统（改造后）	旧系统（改造前）
1	时间	4.24 10:10—17:45	4.23 20:00—06:30
2	运行总时间 (h)	7.5	10.5
3	风量 (m <sup>3</sup> /h)	5500~6000	3500~4000
4	总产量 (kg)	936	1140
5	每小时产量 (kg)	124.8	108.57
6	总蒸汽量 (t)	0.888	1.346
7	总耗电量 (kw.h)	1056.3	1684.3
8	每小时蒸汽量 (t)	0.1184	0.1282
9	每小时耗电量 (kw.h)	140.84	160.4
10	蒸汽价格 (元/t)	180	
11	电价 (元/(kw.h))	0.63	
12	蒸汽费用 (元)	159.84	242.28
13	用电费用 (元)	665.45	1061.1
14	总费用 (元)	825.29	1303.39
15	烘干成本 (元/kg)	0.88	1.15

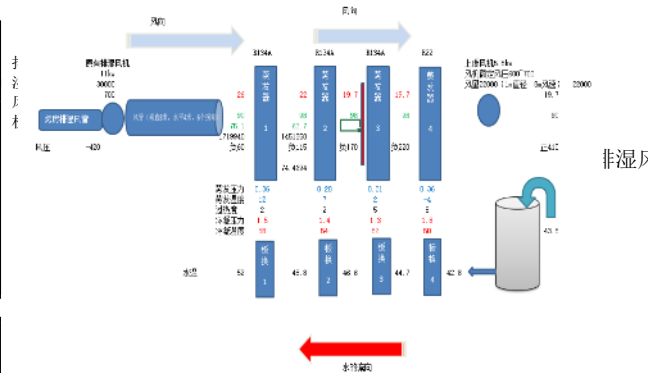
做到尾气近零排放，节能20%以上。

# 典型应用5：挂面干燥应用—流水线

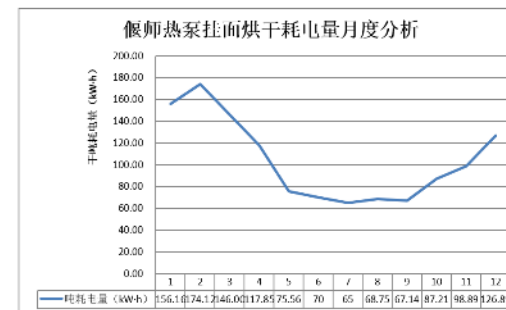
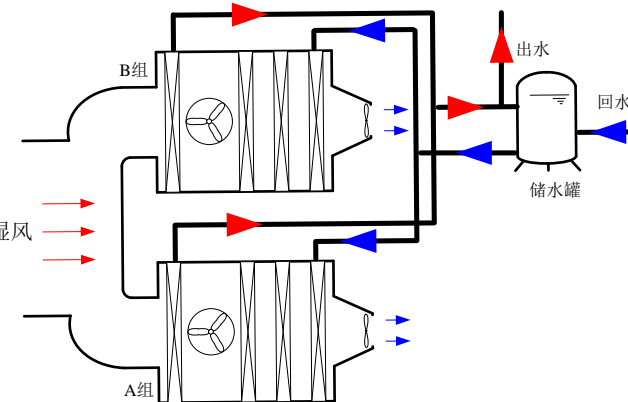
技术拓展：冷凝侧采用板换，送热水到面条干燥间



面条流水线



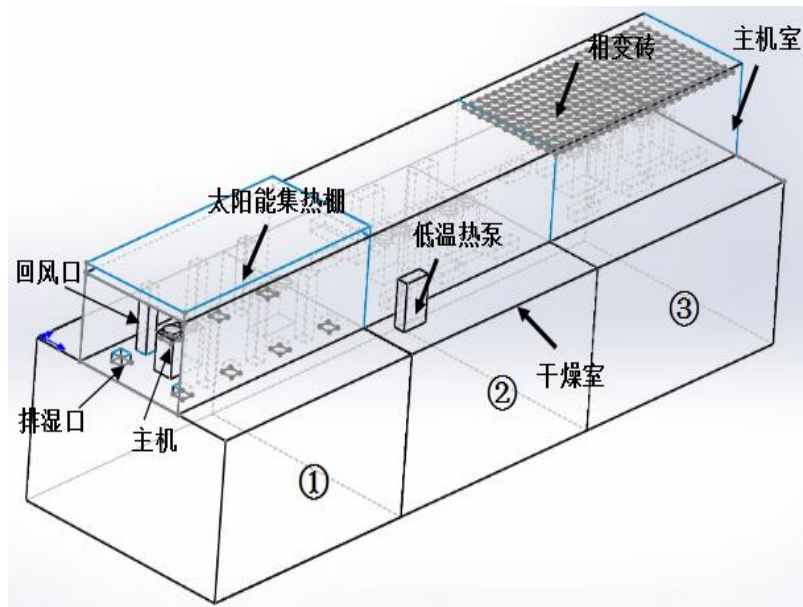
河南偃师第二面粉厂，日干燥30吨挂面



系统平均COP 3.7

系统平均SMER 3.0

## 三、特色技术—封闭式热泵干燥系统



需求

- 低环温下热泵批次式干燥

问题

- 环境温度低
- 不连续排湿
- 干燥温度变化

方法

- 多个热泵单元互补
- 相变蓄热储废热
- 低温空气源热泵补热
- 太阳能补热

产业化装备100余台套，产值3000万元，申请项目3项，发明专利5项

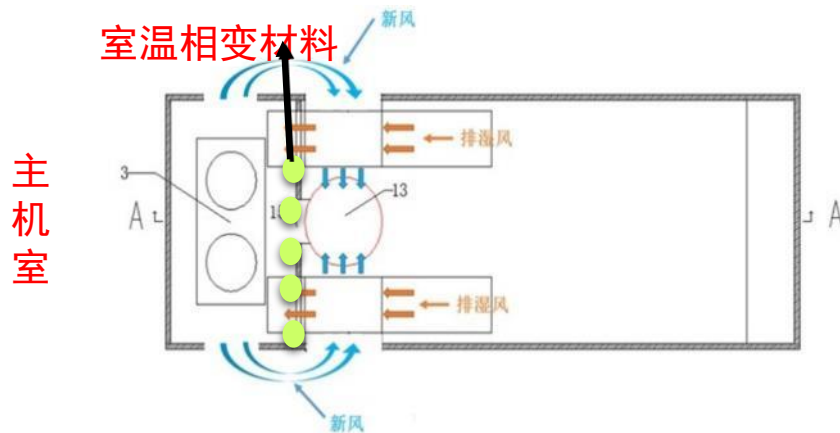




# 典型应用1：天麻封闭热泵干燥系统—箱式

关键技术：

- 利用全热换热器，提高新风温度
- 利用相变材料存储大排潮的废热




**鉴 评 意 见**

2015年12月9日，河南省中国科学院科技成果转化中心组织有关专家在安徽省金寨县对中国科学院理化技术研究所和河南佰衡节能技术有限公司等单位完成的“面向大宗块茎中药材的热泵干燥技术研究及示范”项目进行了现场鉴评。专家组参观了工艺现场，查阅了相关资料，听取了项目汇报，进行了质询，经充分讨论，形成如下意见：

1. 项目创新提出了一种封闭式热泵干燥系统，采用封闭式蒸发器主机除湿的技术，在冬季环境温度较低的情况下，充分利用烤房排出的废热，有效提高蒸发侧的温度，降低了热泵系统能耗，实现了能源高效利用。
2. 试验结果表明：封闭式除湿热泵烤房结构应用于天麻干燥，冷媒温度可以达到75℃以上，循环干燥的空气温度可以达到70℃以上；智能化自控系统操作简便，控制灵敏。
3. 经核算，热泵系统的COP达到了3.0以上，与电热干燥系统相比，该热泵系统运行电耗只有电热系统的1/3。
4. 该烤房在安徽省天麻主产区推广应用，能够满足天麻干燥工艺需求，干燥质量明显优于燃煤烤房；与燃煤烤房相比，无直接CO<sub>2</sub>排放，节能减排效果和经济效益显著，在农产品干燥领域具有广阔的应用前景。

鉴评委员会一致同意推荐该项目推广应用，并建议政府给予政策支持，加大应用推广力度。

主任 

二〇一五年十二月九日

- ✓ 干燥空气温度70℃以上
- ✓ 系统COP达到3.0以上
- ✓ 运行费用是电热的1/3

项目支撑：河南省科技成果转化项目 60万元，目前累计销售20台套

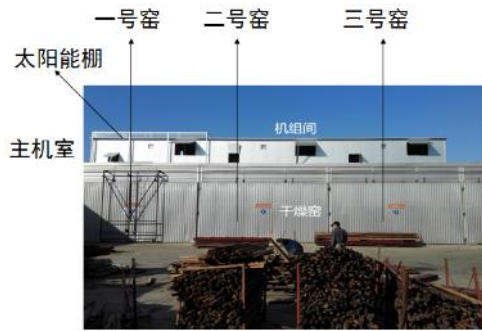


# 典型应用2：封闭式木材热泵干燥系统—箱式

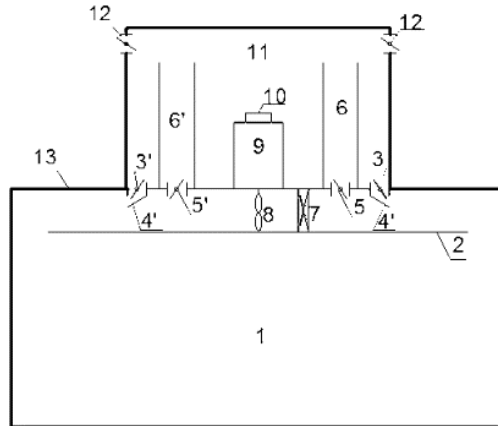
关键技术：

✓ 多台热泵并联，主机室互通

✓ 相变材料用于提高蒸发温度



干燥窑与机组间外观



**鉴 评 意 见**

2016年12月26日，木材节约发展中心组织有关专家在北京通州区木材保护试验基地对中国科学院理化技术研究所和河南佰衡节能技术有限公司完成的“封闭式太阳能辅助热泵及带蓄热热泵干燥木材装备”进行了现场鉴评及验收。专家组参观了工艺现场，查阅了相关资料，听取了项目汇报，进行了质询，经充分讨论，形成如下意见：

1. 项目创新提出了一种新型的封闭式热泵干燥系统，采用封闭式蒸发器主机除湿的技术，在冬季环境温度较低的情况下，充分利用干燥窑排出的废热，有效提高蒸发侧的温度，降低了热泵系统能耗，实现了能源高效利用。
2. 试验结果表明：这种新型封闭式除湿热泵干燥窑结构应用于木材干燥，循环干燥的空气温度可以达到70℃以上；智能化自控系统操作简便，控制灵敏。
3. 经核算，热泵机组的COP平均达到了4.0以上，系统的COP平均达到3.0以上，与电热干燥系统相比，该热泵系统运行电耗只有电热系统的1/3；与传统燃煤锅炉相比，热泵干燥设备的能耗降低10%以上，能源利用率优势显著。
4. 该干燥窑在北京通州区木材保护试验基地的示范应用中，能够满足木材干燥工艺需求，干燥质量明显优于燃煤干燥窑；与燃煤干燥窑相比，无直接CO<sub>2</sub>排放，节能减排效果和经济效益显著，在木材干燥加工领域具有广阔的应用前景。

鉴评委员会一致同意

扶持，加大应用推广力度。

主任

委员

委员

二〇一六年十二月二十六日

年度	建造形式	装载量 (m <sup>3</sup> )	实施地点	数量	运行状况	备注
2016年	改造	100	北京	3	良好	
	新建	50	北京	1	良好	
2017年	改造	100	河南漯河	2	良好	
	新建	100	河南漯河	6	良好	
	新建	100	山东菏泽	1	良好	红木
	新建	50	辽宁大连	1	优良	木地板
	新建	100	辽宁大连	8	良好	干燥红木

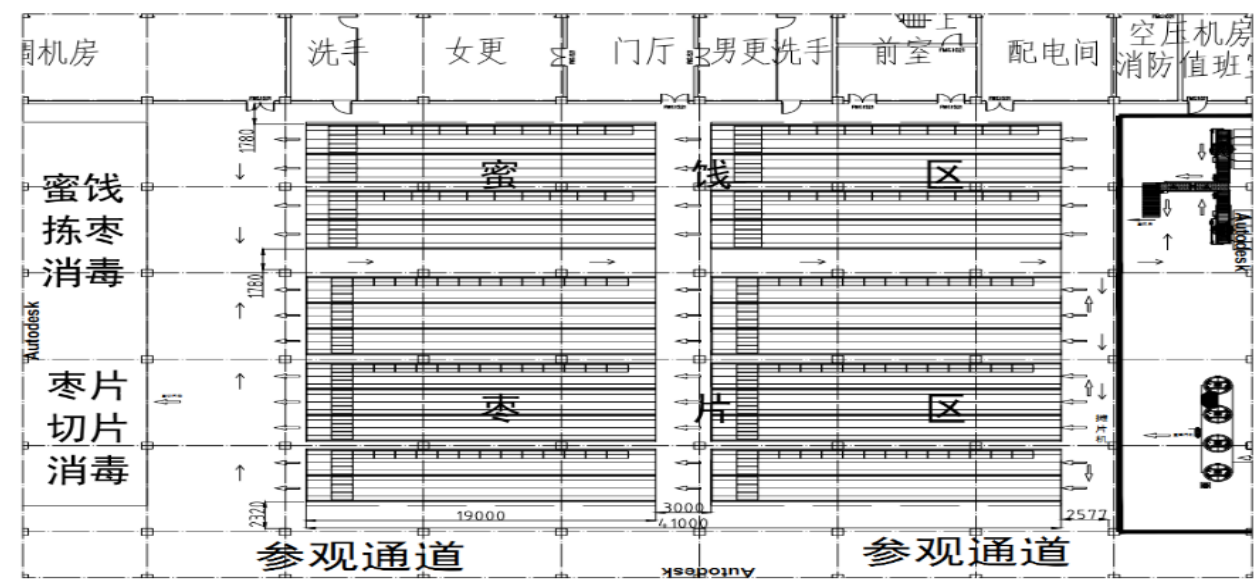
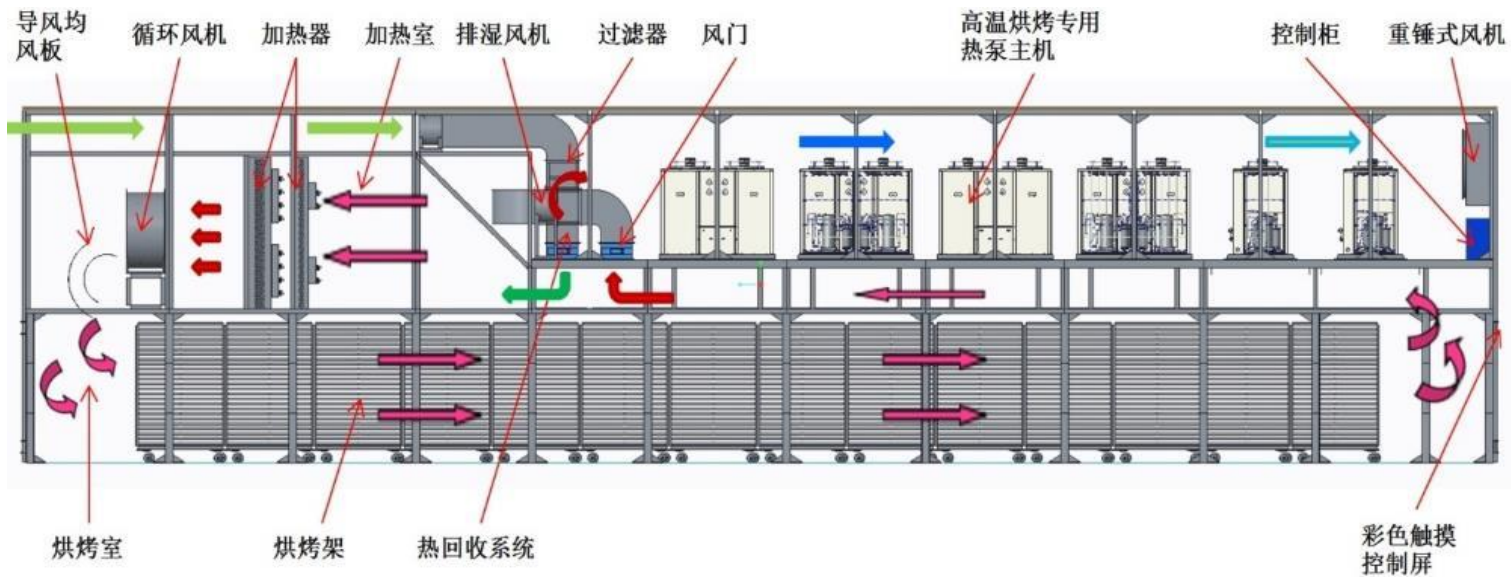
✓ 系统COP达到3.0以上

✓ 运行费用是电热的1/3

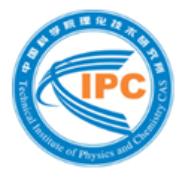
✓ 能耗较燃煤锅炉降低10%以上



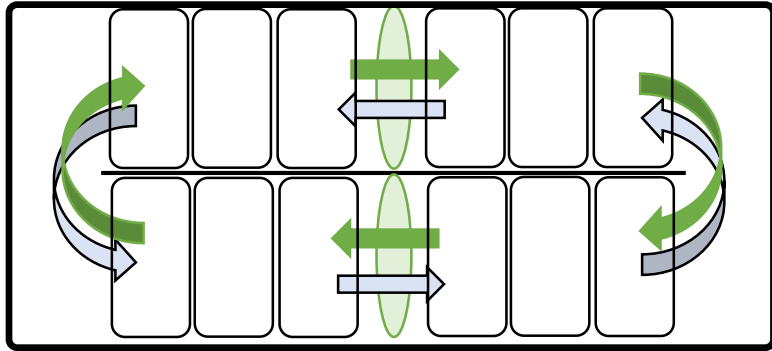
# 典型应用3：封闭式隧道干燥系统—隧道式



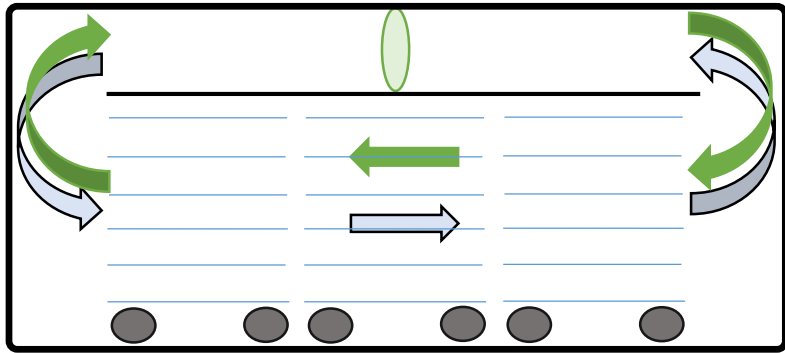
好想你枣业建造的六条枣片、蜜饯干燥生产线，单线日处理量6吨



## 四、特色技术—工厂化集中热泵干燥系统

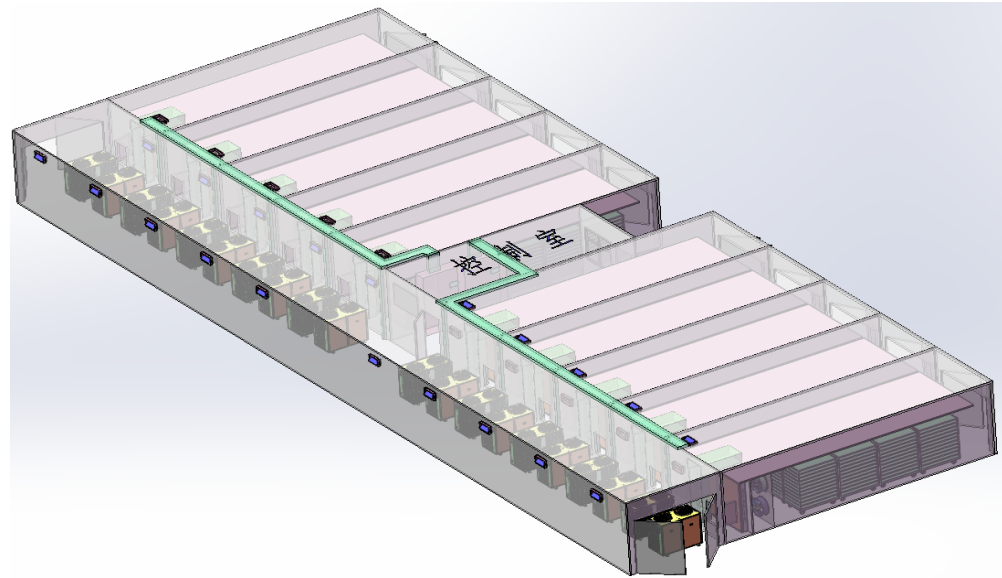


水平式正反转干燥器设计模型



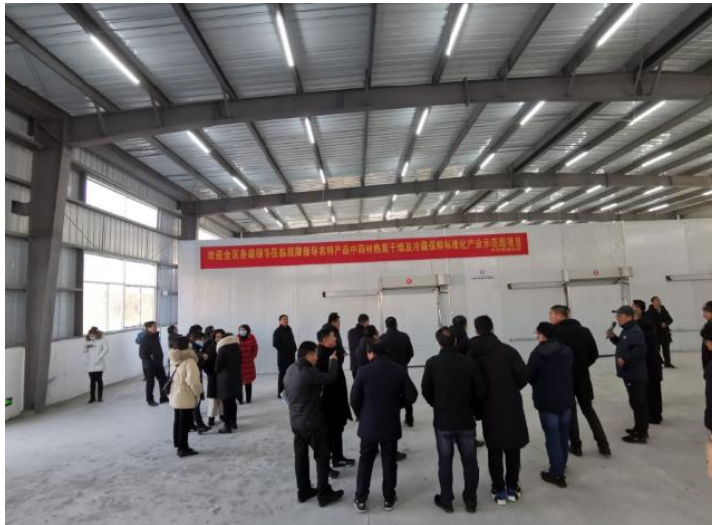
垂直式正反转干燥器设计模型

- ✓ 干燥周期：12-15小时，干燥效率提高30%-50%
- ✓ 主机室温度：可维持在20℃以上
- ✓ 装载量：10-11吨（20车）
- ✓ 干燥能耗：热泵的SMER值最高可达3.0kg/(kW·h)



安徽亳州产业化装备100余台套，建立5各示范工场，产值2000万元

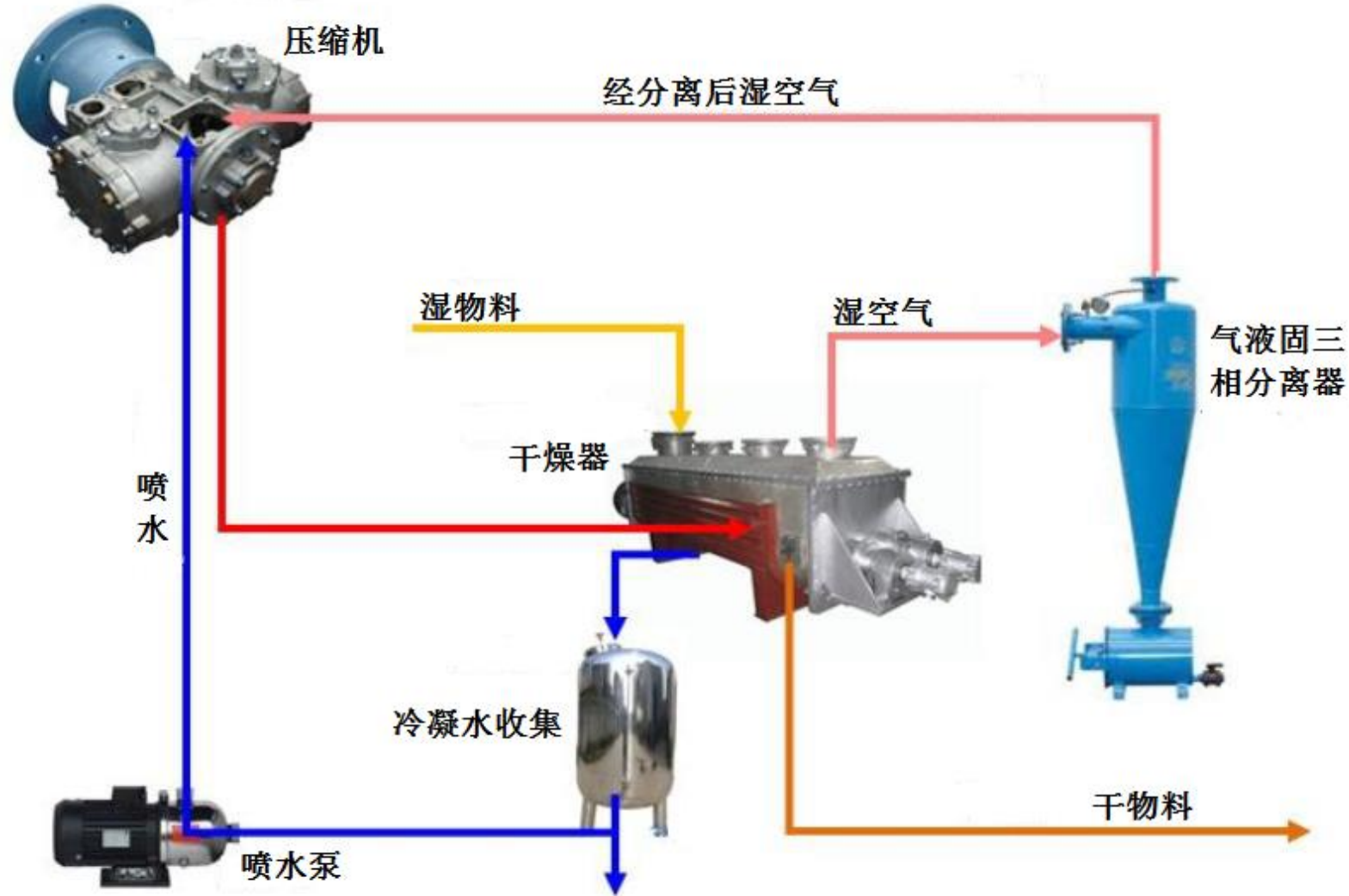
# 典型应用：亳州中药材热泵干燥工场

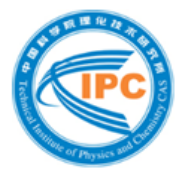




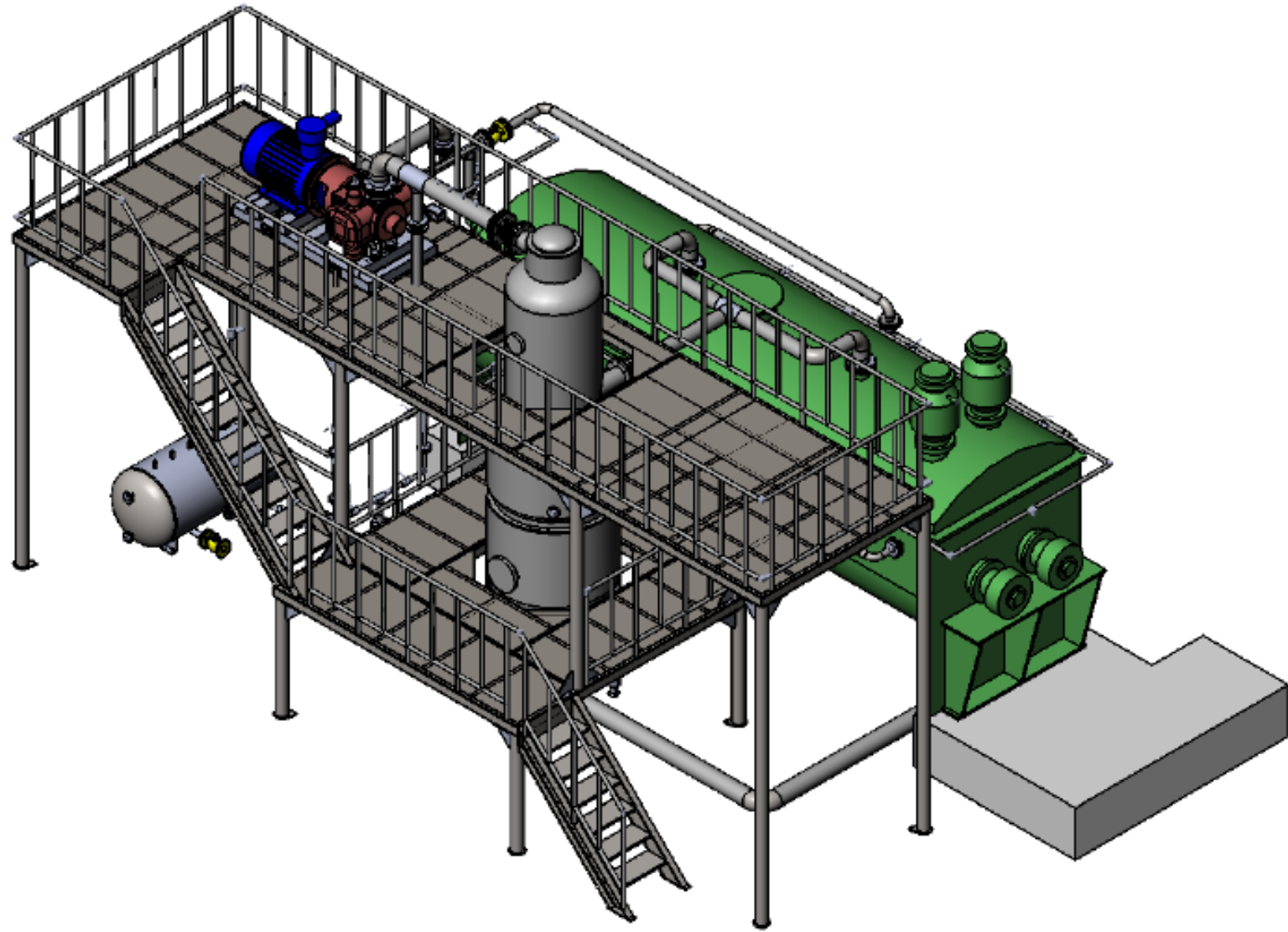
# 典型应用：蒸汽再压缩机的污泥烘干工厂—桨叶式

原理





# MVR污泥干化三维示意图



# MVR污泥干化系统





# 污泥干化效果图



干燥前

干燥出料

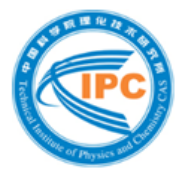
干燥后



# MVR污泥干化部分实验数据

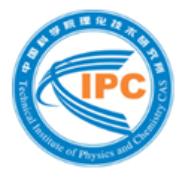
序号	压缩机频率/Hz	干燥机频率/Hz	吸气压力/MPa	吸气温度/°C	排气压力/MPa	排气温度/°C	系统总功率/kw	压缩机功率/kw	桨叶干燥机功率/kw
1	50	5	0.1	99.81	0.24	124.41	48.31	30.53	14.85
2	50	5	0.1	99.68	0.24	125.00	49.11	31.43	14.25
3	50	5	0.1	100.26	0.26	127.91	48.31	30.8	13.11
4	50	5	0.1	99.54	0.30	129.73	49.89	31.88	15.41
5	50	5	0.1	99.99	0.24	124.86	49.16	31.06	15.51
6	50	5	0.1	99.92	0.23	124.05	48.76	30.72	15.61
7	50	5	0.1	99.11	0.25	126.37	51.23	32.22	16.17
8	50	5	0.1	99.3	0.28	126.97	51.28	31.22	17.74
9	50	5	0.1	99.81	0.25	126.42	50.71	31.07	15.53
10	50	5	0.1	100.34	0.26	124.46	48.29	30.17	15.53
平均值	<b>50</b>	<b>5</b>	<b>0.1</b>	<b>99.776</b>	<b>0.255</b>	<b>126.18</b>	<b>49.505</b>	<b>31.11</b>	<b>15.37</b>

实验现象：**进料**污泥含水率约为**85%**，**出料**污泥含水率约为**35%**，  
系统实验过程中**补气阀**基本处于**关闭状态**。



## MVR污泥干化系统性能研究

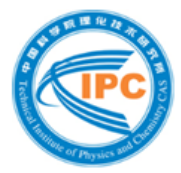
为实现电镀污泥减量，节约干化过程能耗，建立了基于MVR热泵技术的电镀污泥干化系统，采用单螺杆压缩机驱动空心桨叶干燥机进行连续恒速干燥实验研究。实验结果表明：在恒速段时，压缩机频率为50Hz，干燥机频率为5Hz，吸气温度99.78°C，排气温度126.18°C，压比2.55，系统总功率49.5kw，压缩机功率31.11kw，桨叶干燥机功率15.4kw，蒸发量约为400kg/h，系统总COP为4.91，系统总SMER为8.08kg/(kw h)。



# 小结：热泵干燥技术的经济社会效益



升级关键技术，提升行业水平，服务产业和社会发展的



谢谢！