第二届国际可再生能源供热技术大会

太阳能多模式干燥农产品的应用及其关键技术

报告人：**李明** 教授/博导
云南师范大学 科学技术处
云南省高校太阳能供热与制冷重点实验室

云南师範大學

CATALOGUE

汇报提纲

01 研究团队与工作基础

02 太阳能干燥的背景与意义

03 太阳能干燥研究

04 太阳能-热泵耦合干燥研究

05 总结与展望

实验室依托平台

人民日报 有品质的新闻 打开

中国-老挝"可再生能源"的跨国合作之路

人民日报客户端 杨丛森 牛凌燕 2021-11-23 15:02

在中老铁路开通前夕的10月11日，"中国—东盟可再生能源联合实验室应用示范国际培训班"在云南师范大学开班。25名老挝学员和来自泰国、柬埔寨、印度尼西亚等国家的学员一起，以线上线下的方式参与培训。这也是2013年以来举办的第七期国际培训班。

可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室（2003）

云南省应用技术研究院可再生能源中心（2009）

国家太阳能热水器质量监督检验中心（2010）

云南省太阳能应用研发中心（2011）

云南省高校太阳能工程中心（2011）

云南省生物质能研发中心（2011）

云南省农村能源工程重点实验室

云南省国际科技合作基地（2012）

中英联合实验室（2012）

外籍（英）院士工作站（2012）

云南省可再生能源能效测评中心

中国-老挝可再生能源开发与利用联合实验室（2013）

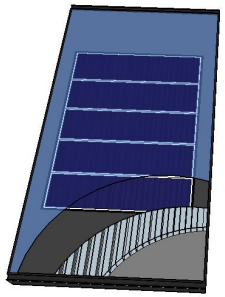
周国富专家工作站（2016）

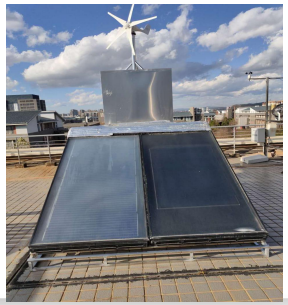
太阳能供热与制冷重点实验室（2020）

工作基础

太阳能干燥

开发了多种新型太阳能空气集热器，并将太阳能与风能等相结合。产品在老挝、泰国等地得到推广应用。





太阳能与热泵耦合高效干燥

针对高原特色农产品干燥、多热源耦合干燥方面，已获多项国家自然科学基金、云南省重大科技专项、云南省重点项目资助。

典型农作物干燥

针对高原特色农副产品的干燥特性，有效成分进行了分析。对比了不同干燥方式下物料的有效成分、外观、内部微观结构等。

云南省绿色发展**“三张牌”**战略目标明确了“绿色能源”、“绿色食品”重要性。

高原特色现代农业产业

打高原牌、走特色路

云南省“十四五”高原特色现代农业发展规划

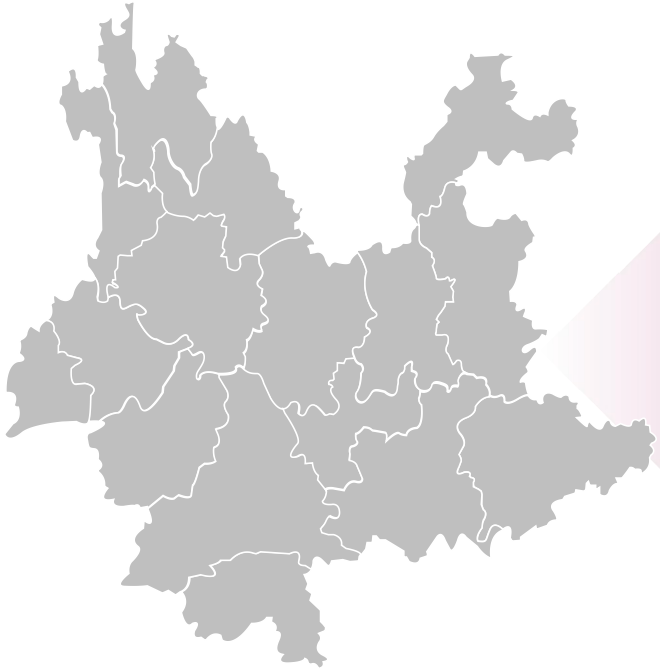
建设主要农作物生产全程机械化示范区
围绕“绿色食品牌”重点产业，发展高效设施农业技术及装备

关于加快构建现代化产业体系的决定

提出打造云南高原特色现代农业
明确到2030年高原特色现代农业占GDP比重达到10%

服务地方经济发展

鲜切花、天然橡胶、咖啡、烤烟、核桃、中药材播种面积和产量连年保持全国第1位



- 生物医药和大健康产业
- 旅游文化产业
- 信息产业
- 现代物流产业
- **高原特色现代农业产业**
- 新材料产业
- **先进装备制造业**
- 食品与消费品制造

传统干燥技术 ➡

自然晾晒

效率低、周期长

锅炉干燥

能耗高，污染大

太阳能干燥

不连续，温度控制困难

新型干燥技术 ➡

真空冷冻干燥

真空冷冻干燥可保留药材的形状、气味、色泽和有效成分，防止物料氧化，但**设备昂贵**。

远红外干燥

照射均匀，可保留有效成分、气味和色泽，**物料内部微孔增加。**

微波干燥

物料升温均匀，易改变物料结构，设备成本高，**微波分布不均匀易过热，产生电弧使设备受损**。

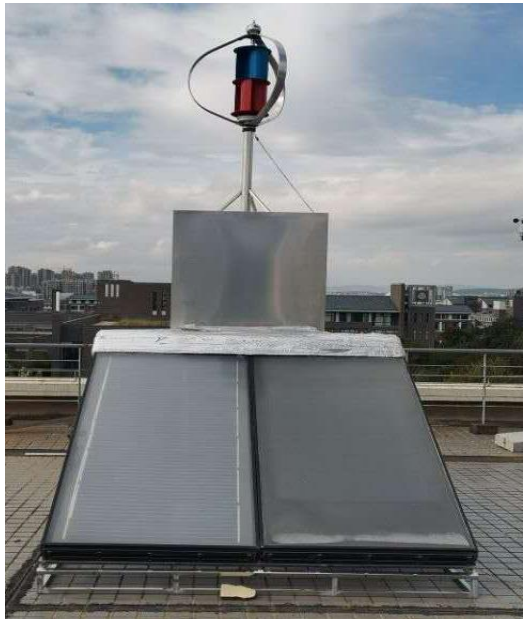
冷冻干燥

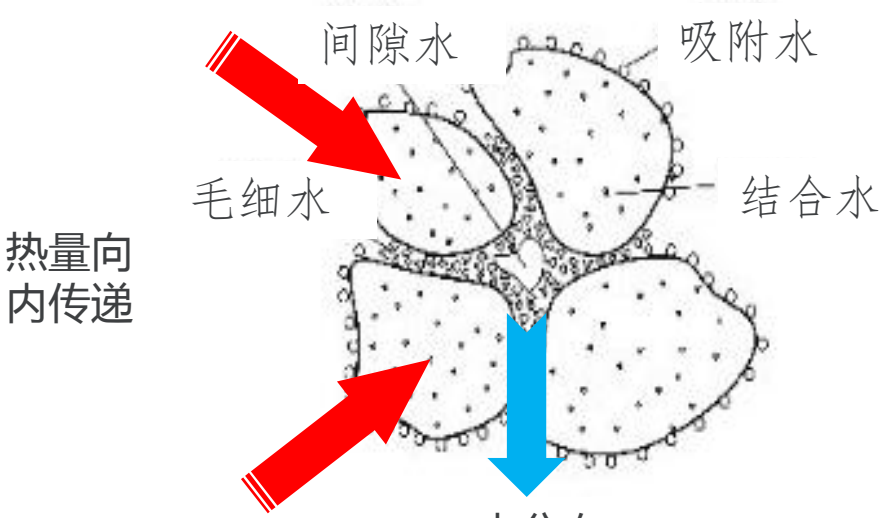
低温下进行，保留药材的色泽，导致**物料结构疏松，设备成本高**。

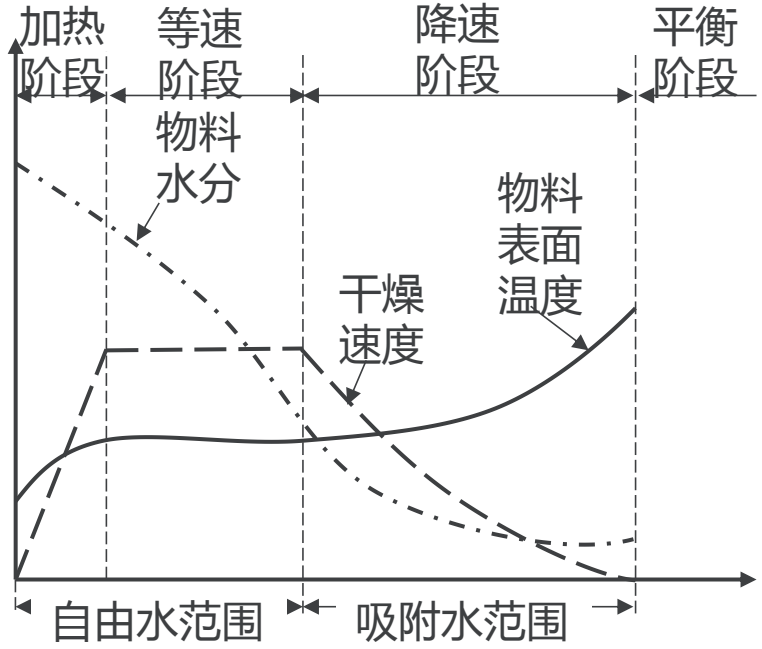
热泵干燥

干燥时间短，节能显著，设备成本低，可大批量干燥，干燥工艺较成熟。

其中节能环保效果较好，技术发展较成熟的太阳能及空气能（热泵）被广泛应用于干燥行业。







红薯干燥

辣椒干燥

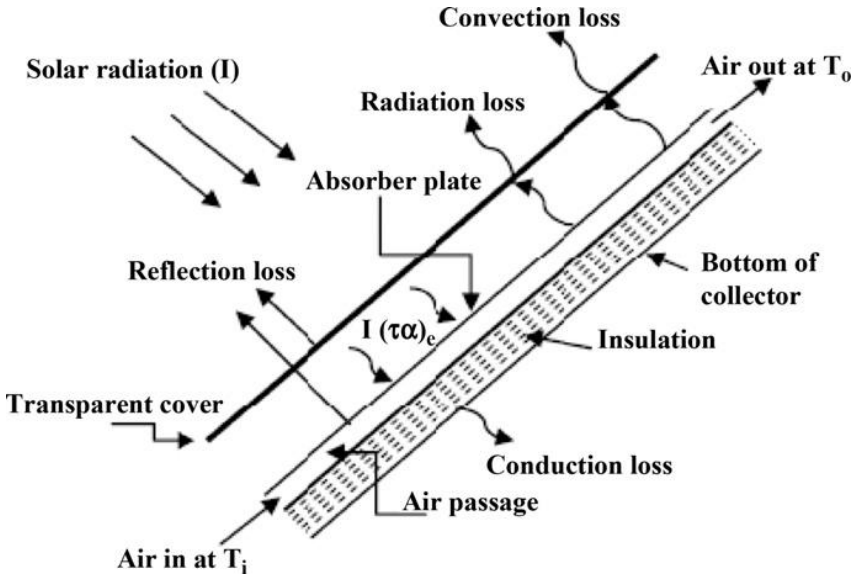
萝卜干燥

干燥的热湿传递过程包括热量交换和质量交换，取决于温度、湿度、风速、压力等干燥工艺参数的变化。

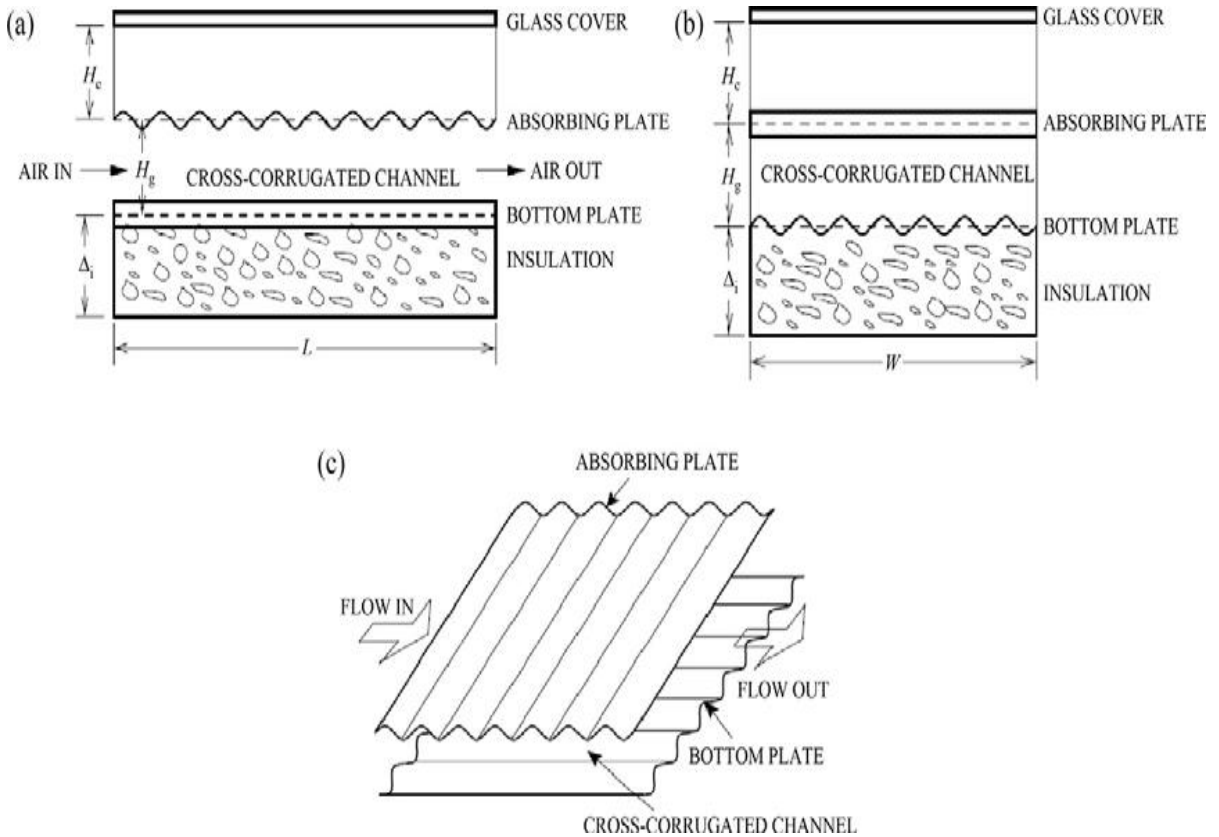
物料热湿传递过程机理是物料失水特性揭示、干燥工艺优化以及最优干燥品质获取的基础。

优点	缺点	物料
热空气温度高、风速度快； 干燥速率相对较快	热空气温度高不易控制； 湿空气余热直接被排放至环境中去，造成余热浪费； 受天气影响严重，波动性大； 对不同物料干燥品质影响较大；	对时效性和热稳定性要求不高的物料； 能耐高温性物料。

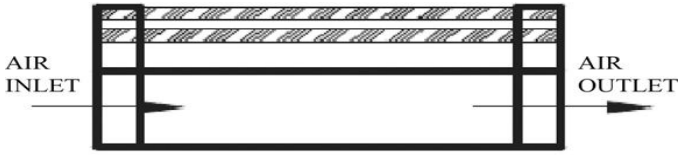
传统单通道平板空气集热器



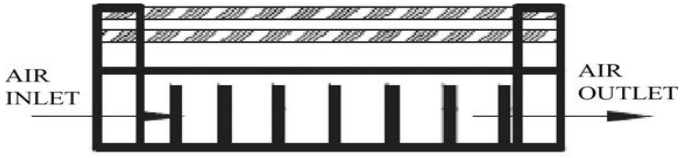
改进交叉型平板空气集热器



改进单通道平板空气集热器



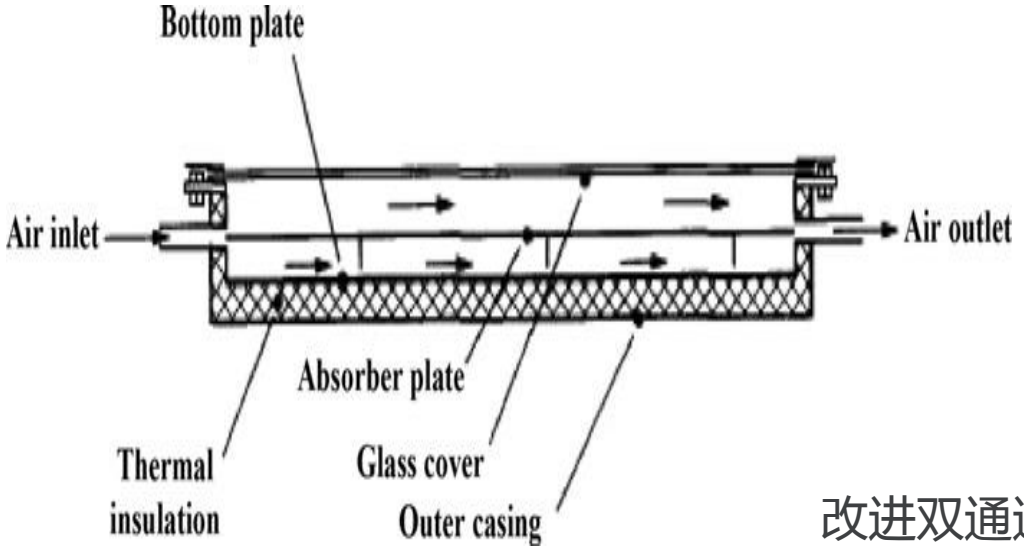
(a) TYPE I (with double glass cover and without fins)



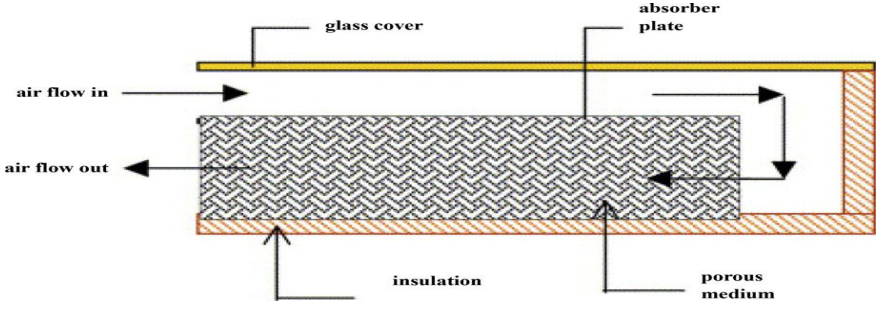
(b) TYPE II (with double glass cover and fins)

(c) TYPE III (with single glass cover and fins)

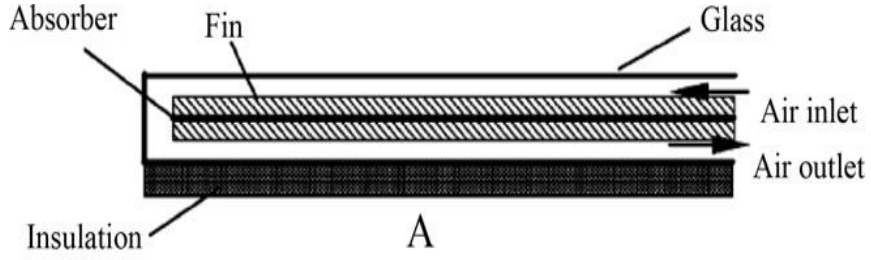
改进双通道平板空气集热器



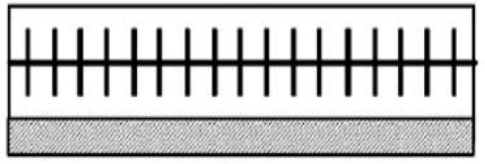
改进双通道多孔隙平板空气集热器



改进双通道翅片式平板空气集热器

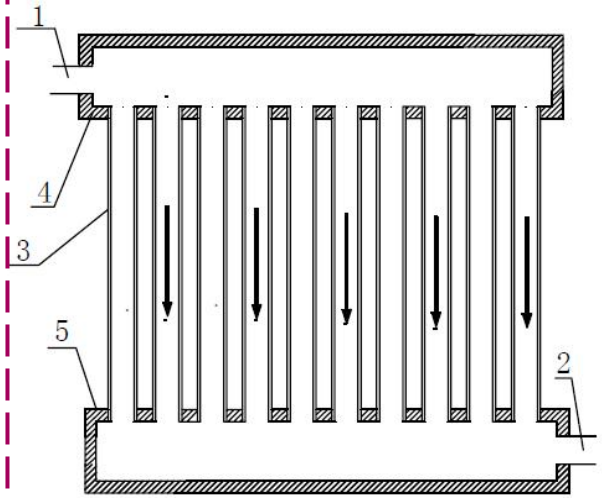


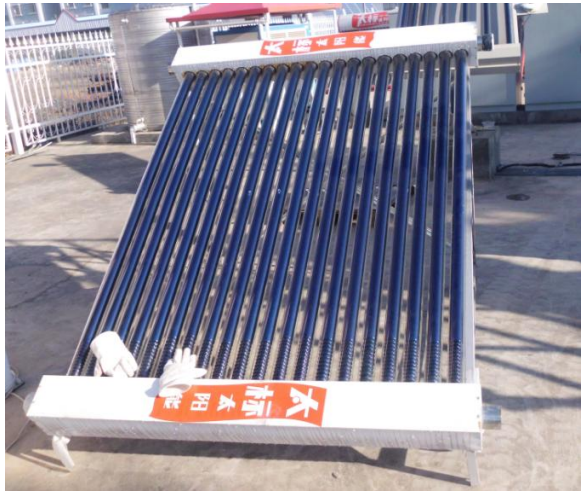
A



B

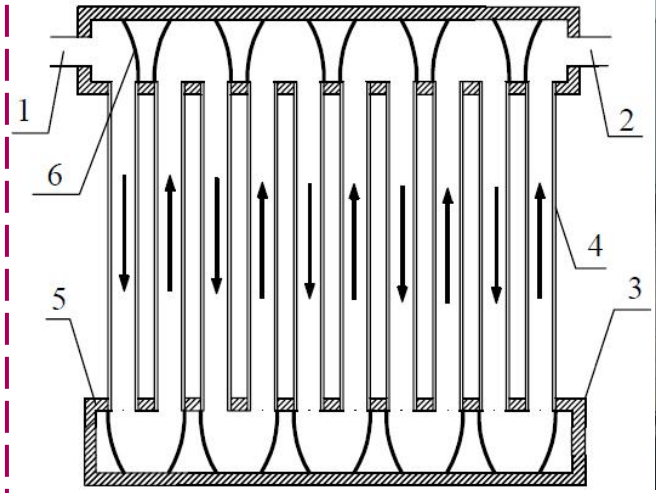
关键部件：集热器





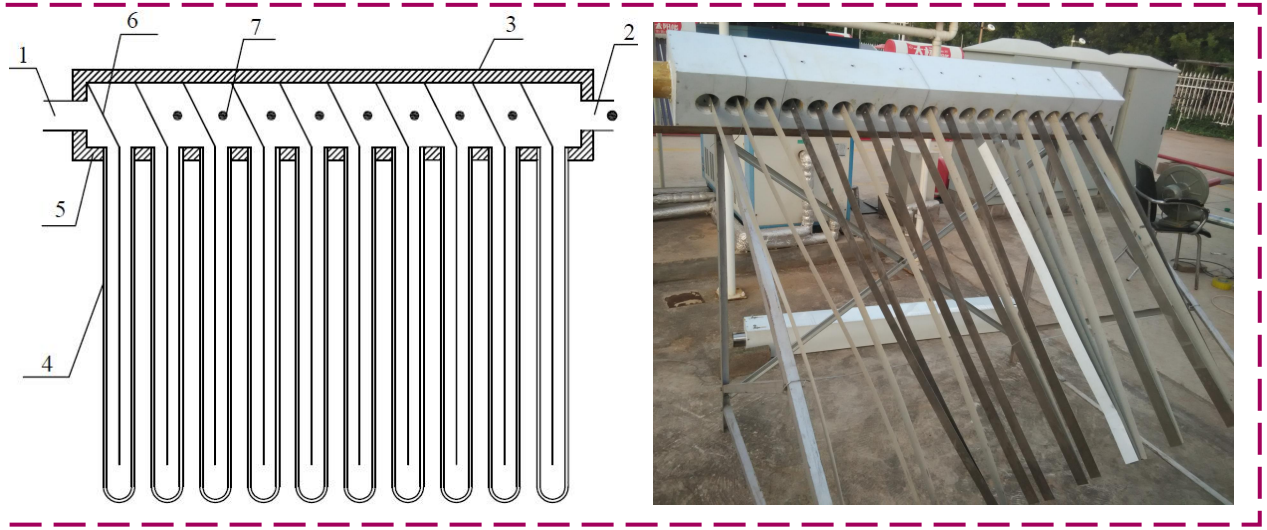
传统直通真空管空气集热器

新型直通真空管空气集热器

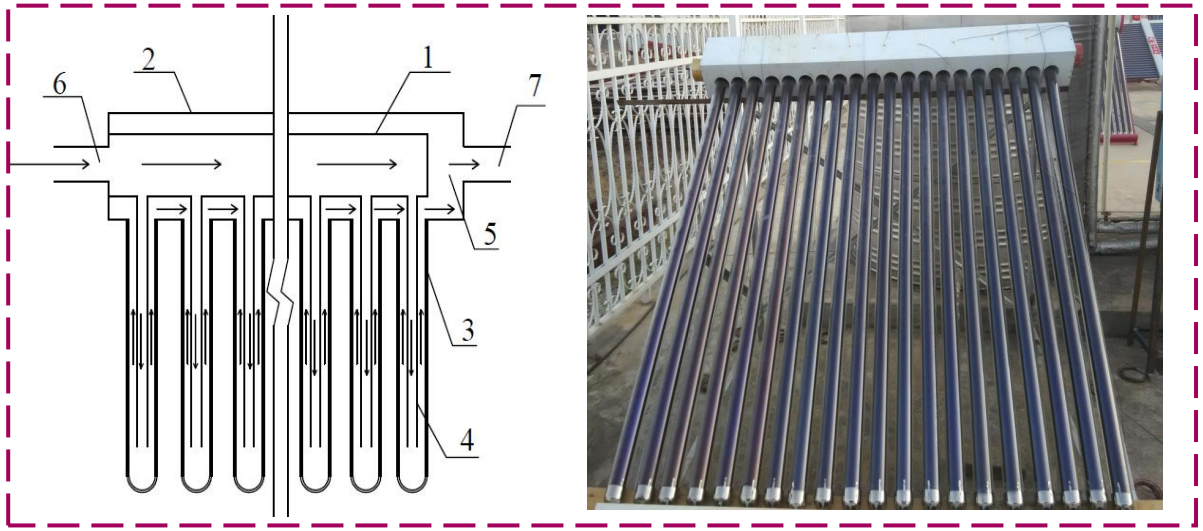


关键部件：集热器

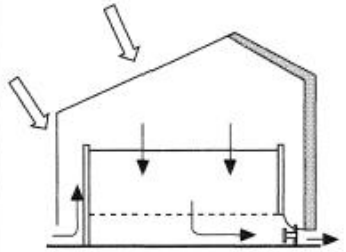
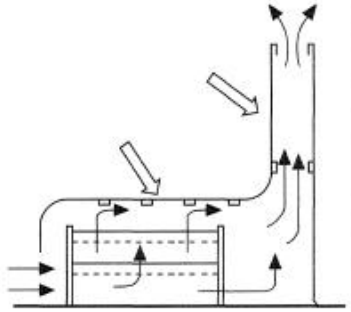
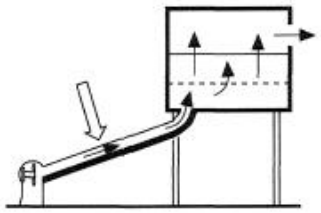
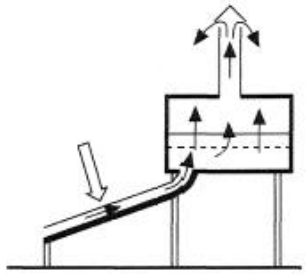
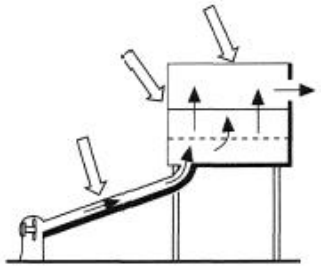
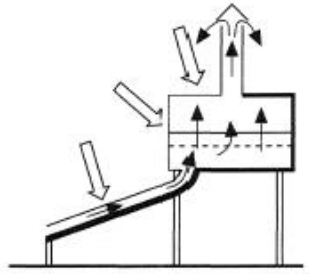
挡板式真空管空气集热器

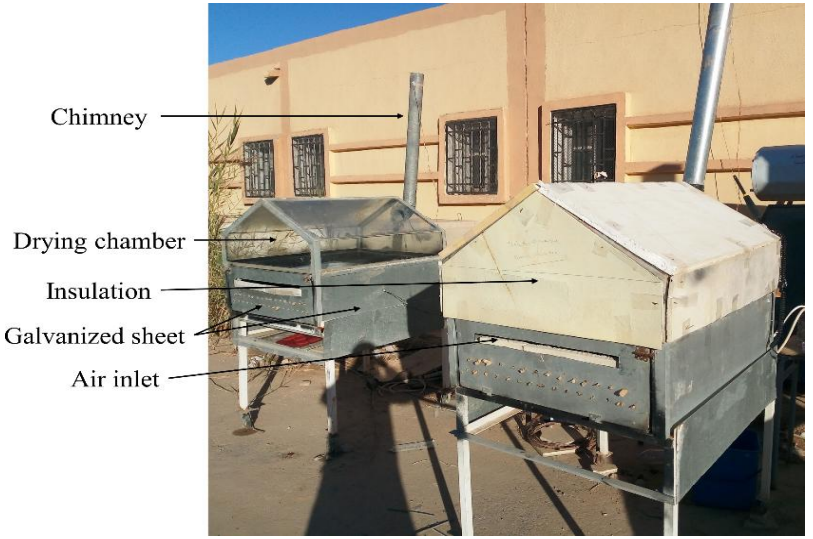


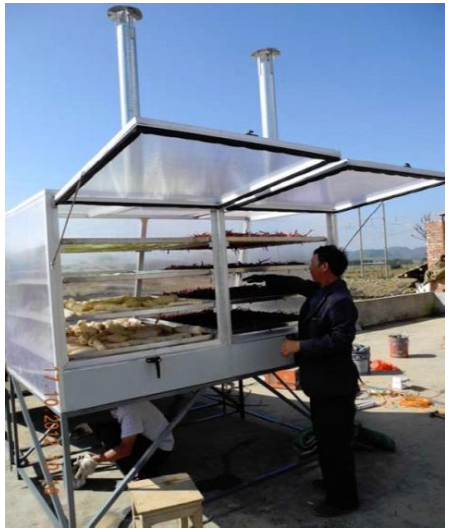
内插式真空管太阳能空气集热器



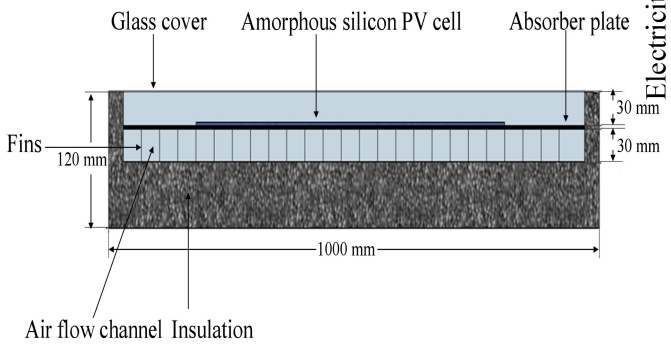
干燥系统集成

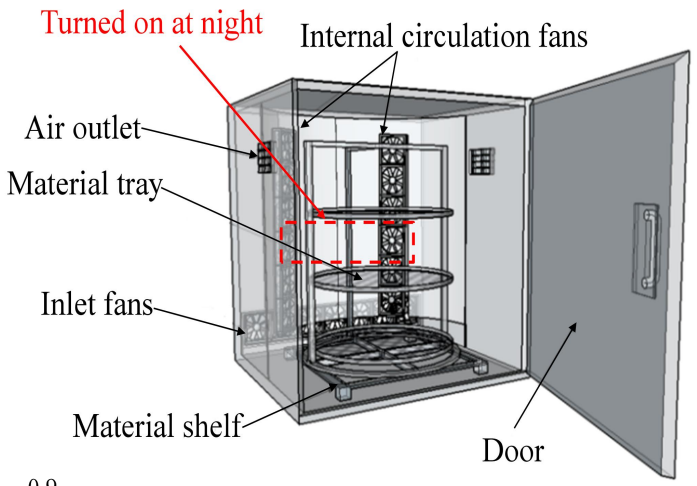
	主动式干燥	被动式干燥
直接干燥方式 (一体式)		
间接干燥方式 (分体式)		
混合干燥方式		

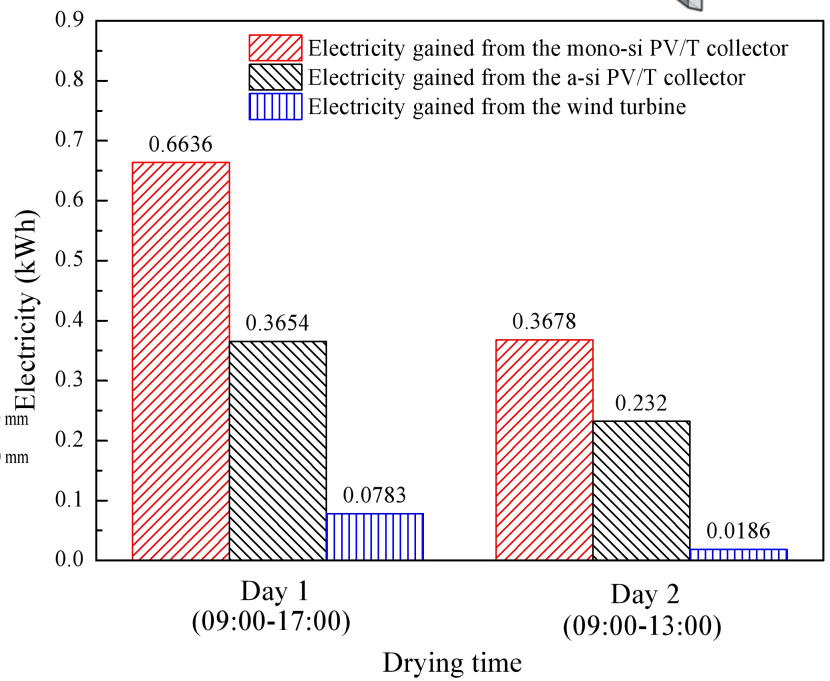


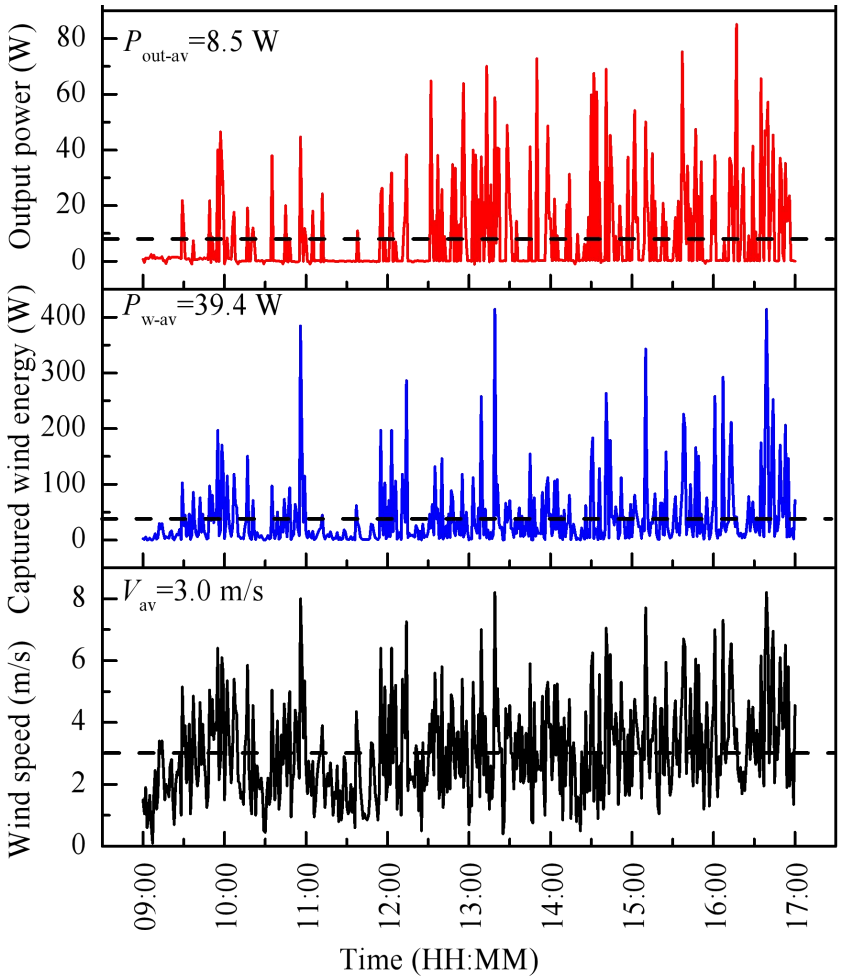


PV/T耦合风能

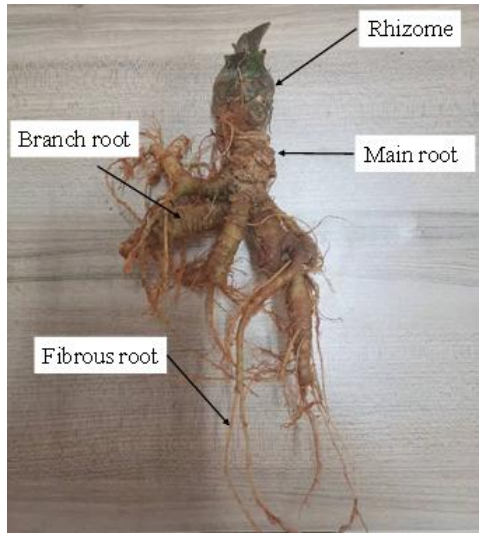

Glass cover
Amorphous silicon PV cell
Absorber plate
Fins
120 mm
30 mm
30 mm
1000 mm
Air flow channel
Insulation

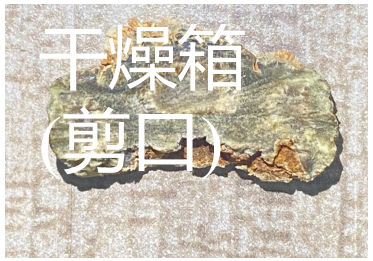

Turned on at night
Internal circulation fans
Air outlet
Material tray
Inlet fans
Material shelf
Door


Electricity gained from the mono-si PV/T collector
Electricity gained from the a-si PV/T collector
Electricity gained from the wind turbine
Electricity (kWh)
0.6636
0.3654
0.0783
0.3678
0.232
0.0186
Day 1
(09:00-17:00)
Day 2
(09:00-13:00)
Drying time


P_{out-av}=8.5 W
Output power (W)
P_{w-av}=39.4 W
Captured wind energy (W)
V_{av}=3.0 m/s
Wind speed (m/s)
09:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
Time (HH:MM)

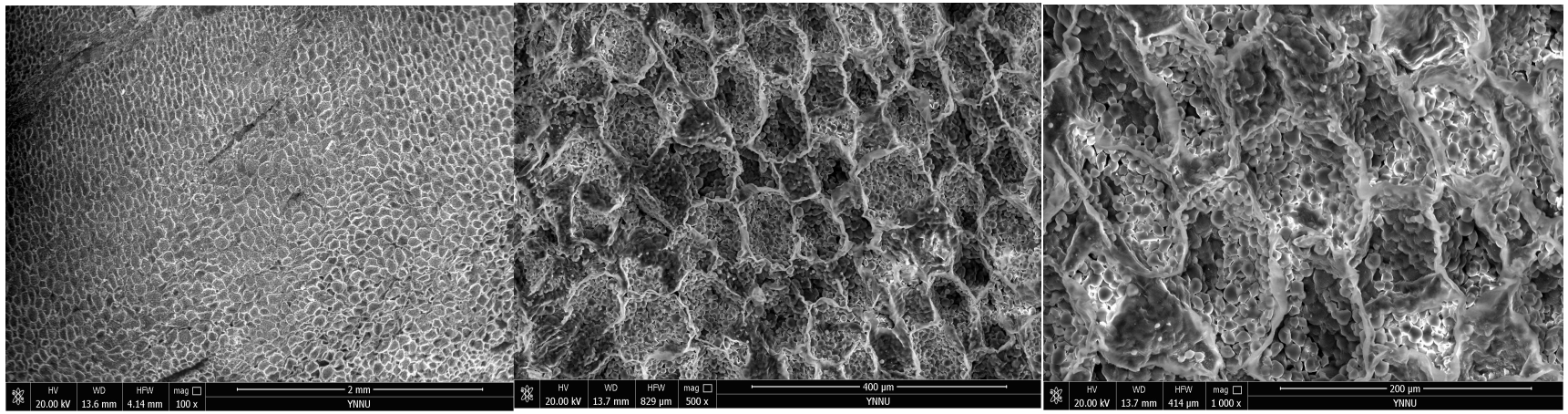
太阳能干燥特性



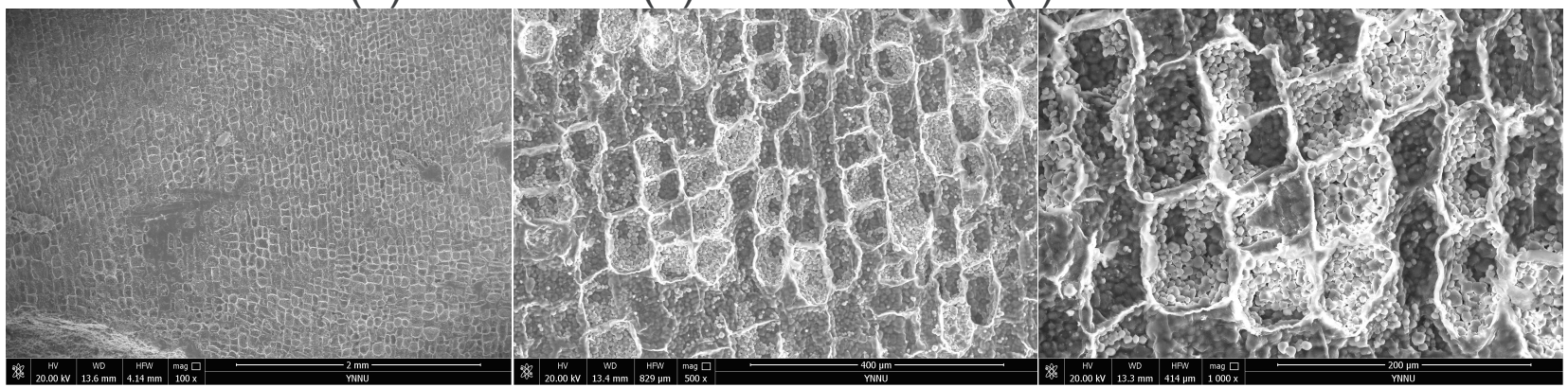


扫描电镜看主根干燥后的细胞脱水情况

分别放大×100, ×500 和 ×1000倍



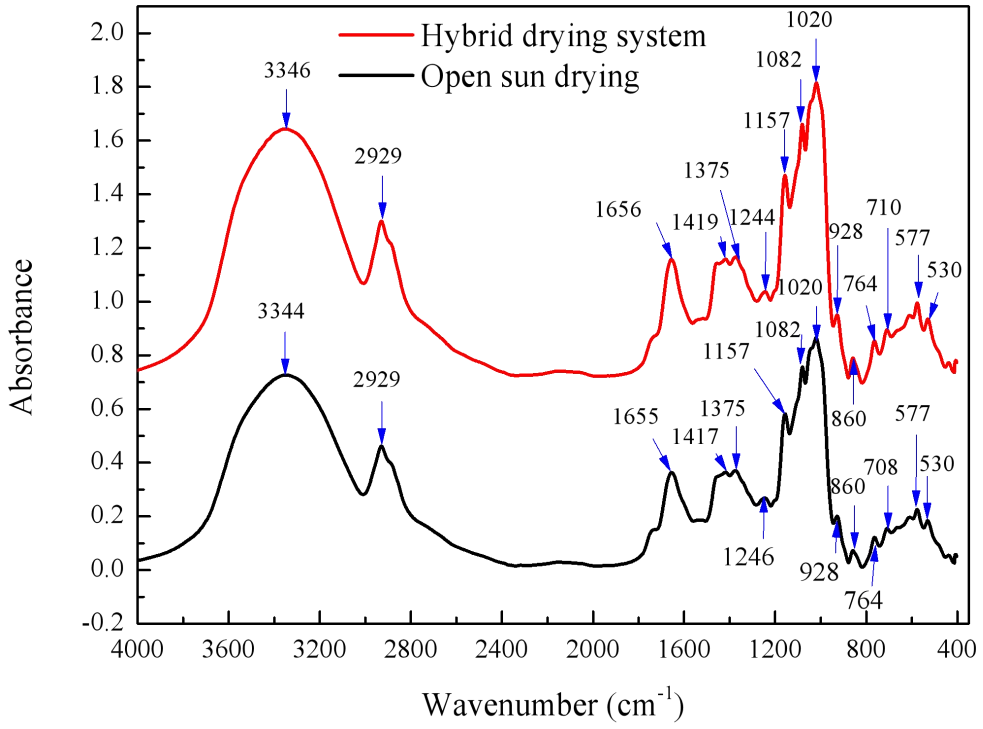
太阳能干燥 (a) (b) (c) 5.9%.



自然晾晒 (d) (e) (f) 12.6%.

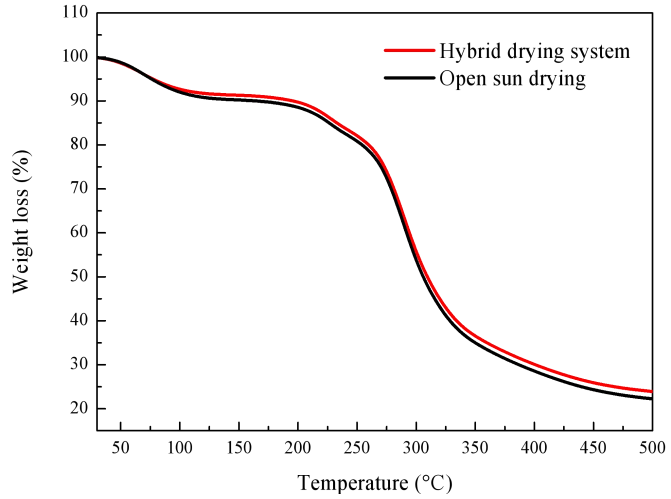
太阳能干燥特性

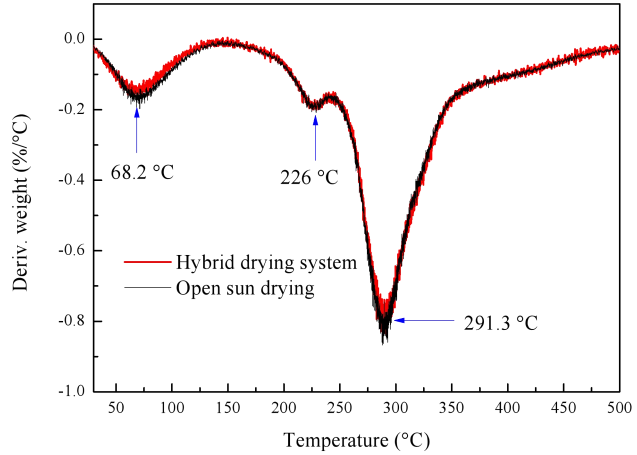
太阳能干燥与自然干燥三七主根成分变化对比

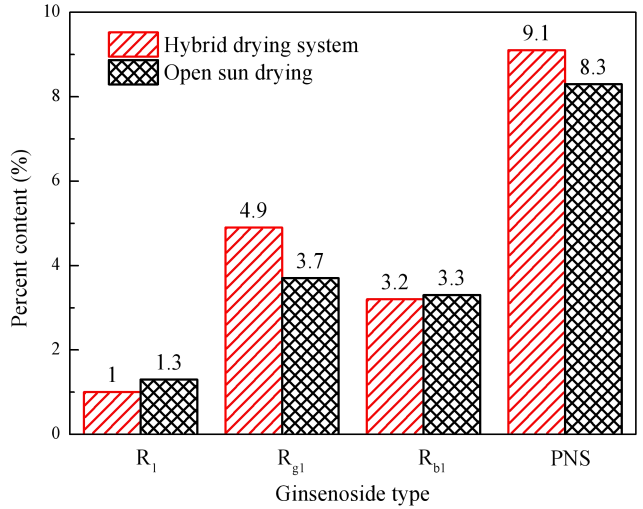


傅里叶红外光谱（FTIR）分析

干燥物料热重分析
TG curves and DTG curves

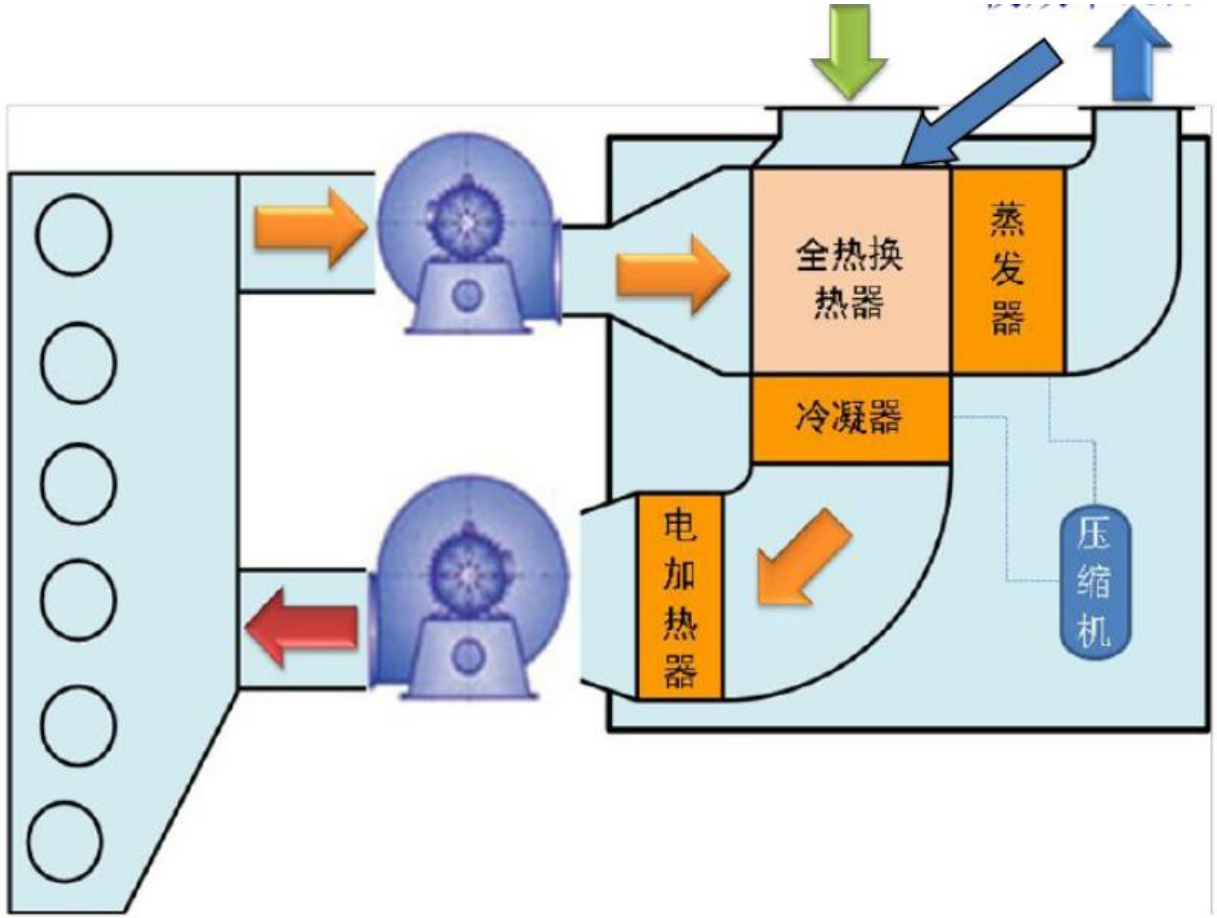




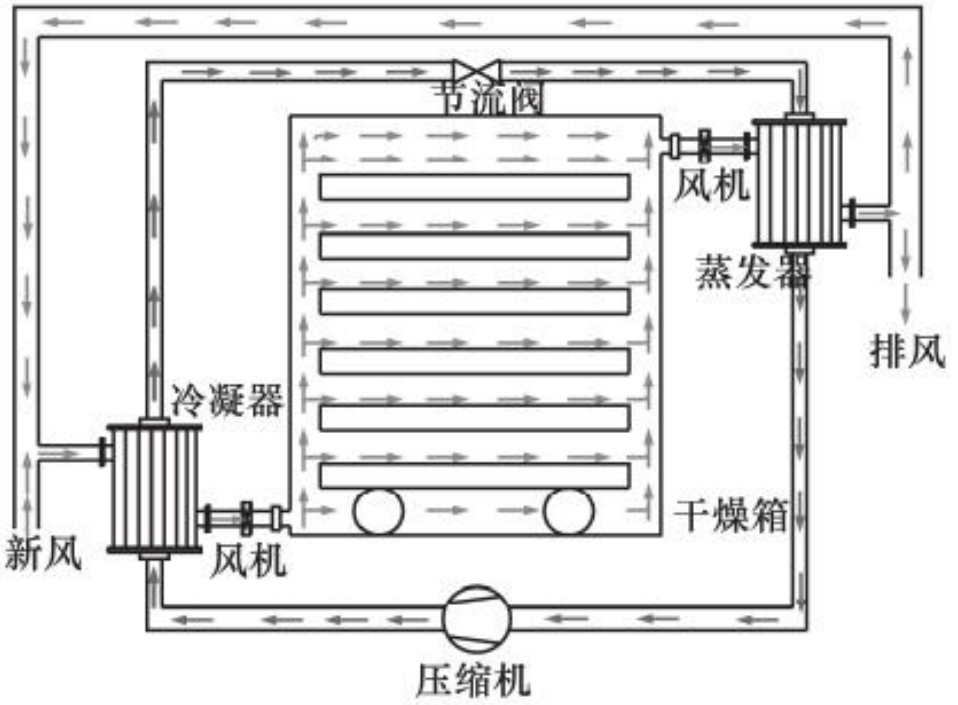


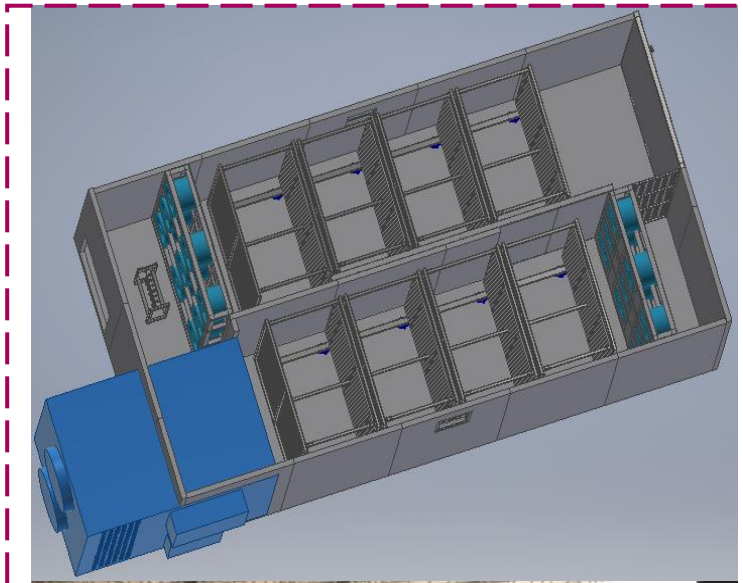
三七皂苷
R1, Rg1, Rb1 and PNS
对比

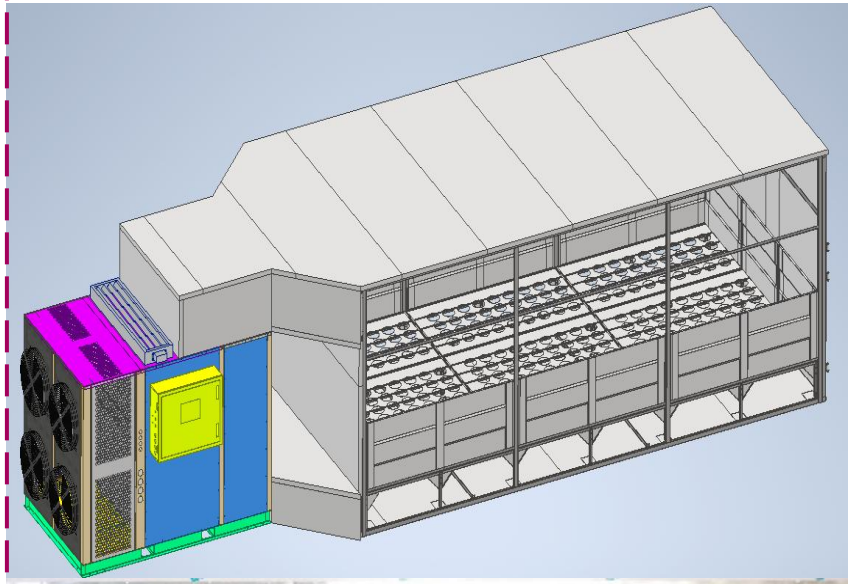
目前常见商用热泵烘干系统

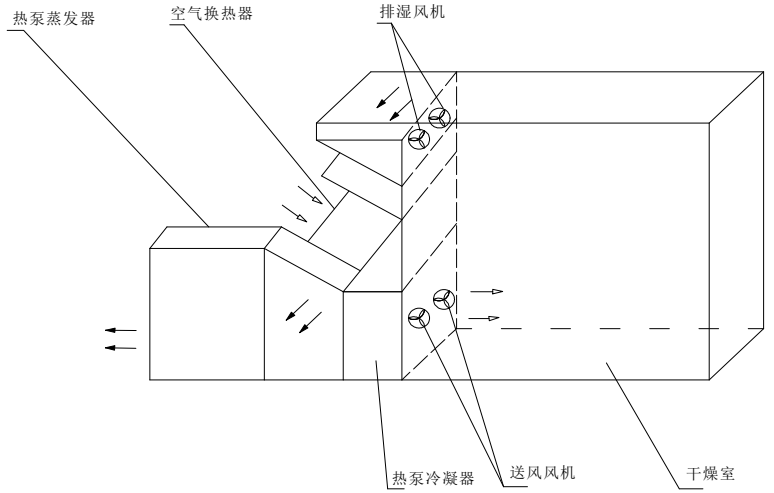


半开式热泵干燥系统








热泵蒸发器
空气换热器
排湿风机
热泵冷凝器
送风风机
干燥室

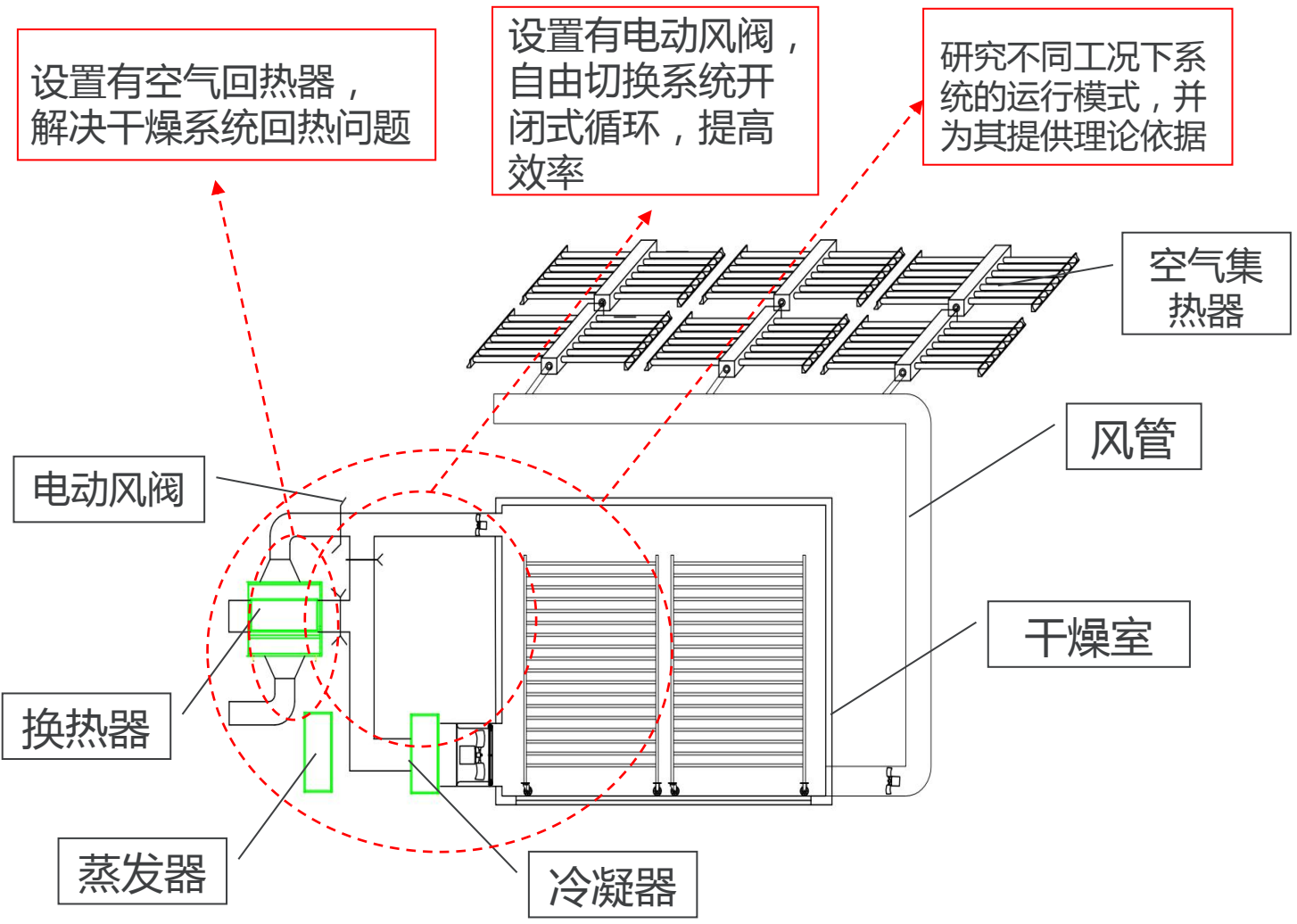
“太” “空”联合干燥

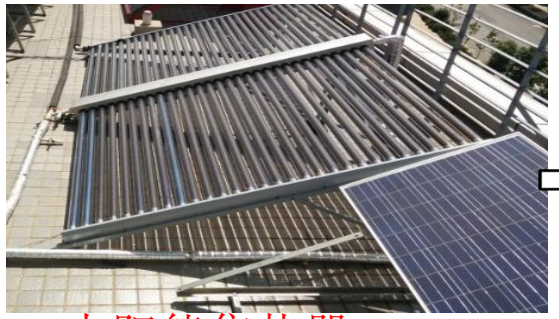
两级回热干燥系统

设置有空气回热器，解决干燥系统回热问题

设置有电动风阀，自由切换系统开闭式循环，提高效率

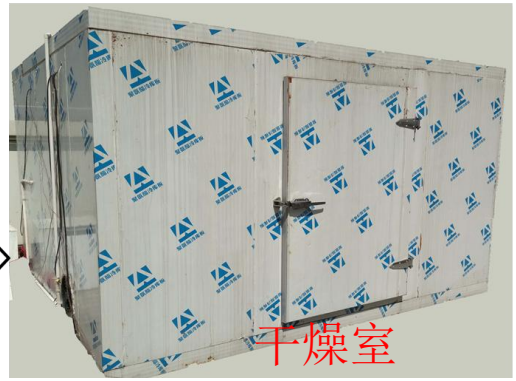
研究不同工况下系统的运行模式，并为其提供理论依据




太阳能集热器

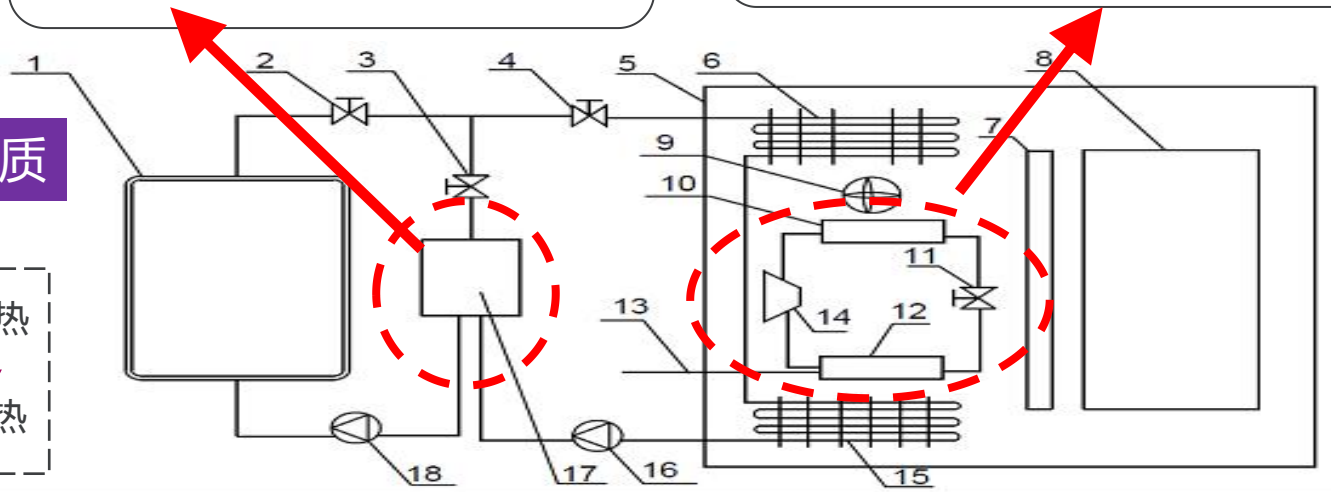
蓄热水箱

热泵


干燥室

设有蓄热装置，解决系统在太阳能干燥模式下的稳定性和提高太阳能的利用率问题

该系统将热泵集成到干燥室内并采用双盘管解决回热问题



冷凝器

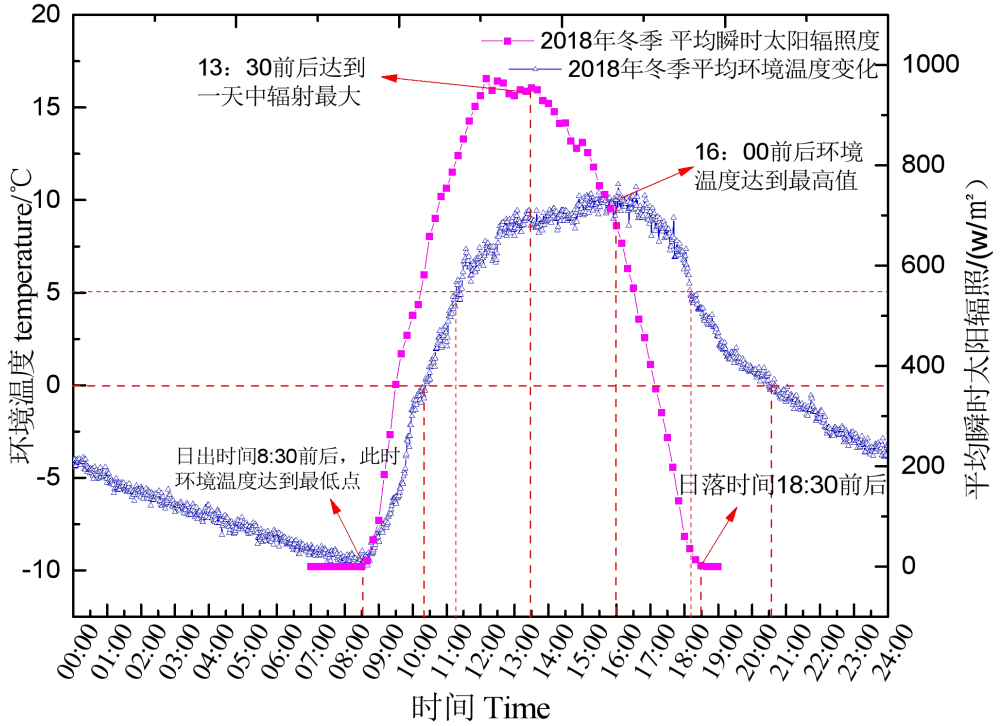
利用水为蓄热介质

太阳能 → 热水 → 供热
储热（水）← 回热

Y.Qiu, **M. Li**, Y.F.Wang, et al. Performance and operation mode analysis of a heat recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system,2016, Solar energy 137.225-235

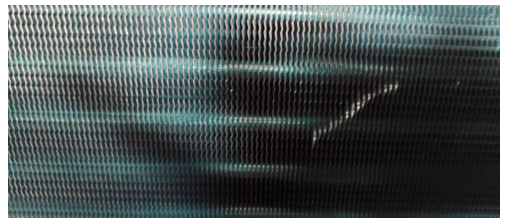
用于低温环境

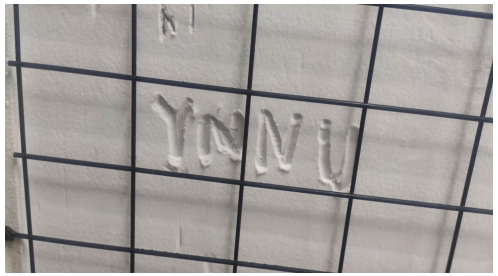
严寒大温差工况下空气源热泵干燥系统蒸发器结霜严重，制热量衰减。



翅片结霜前

翅片结霜后



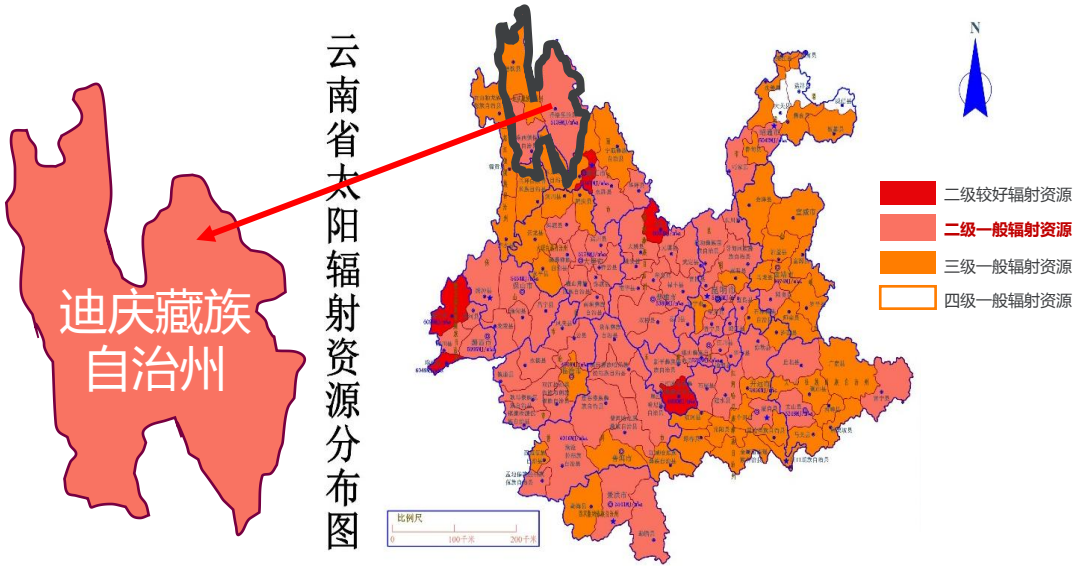


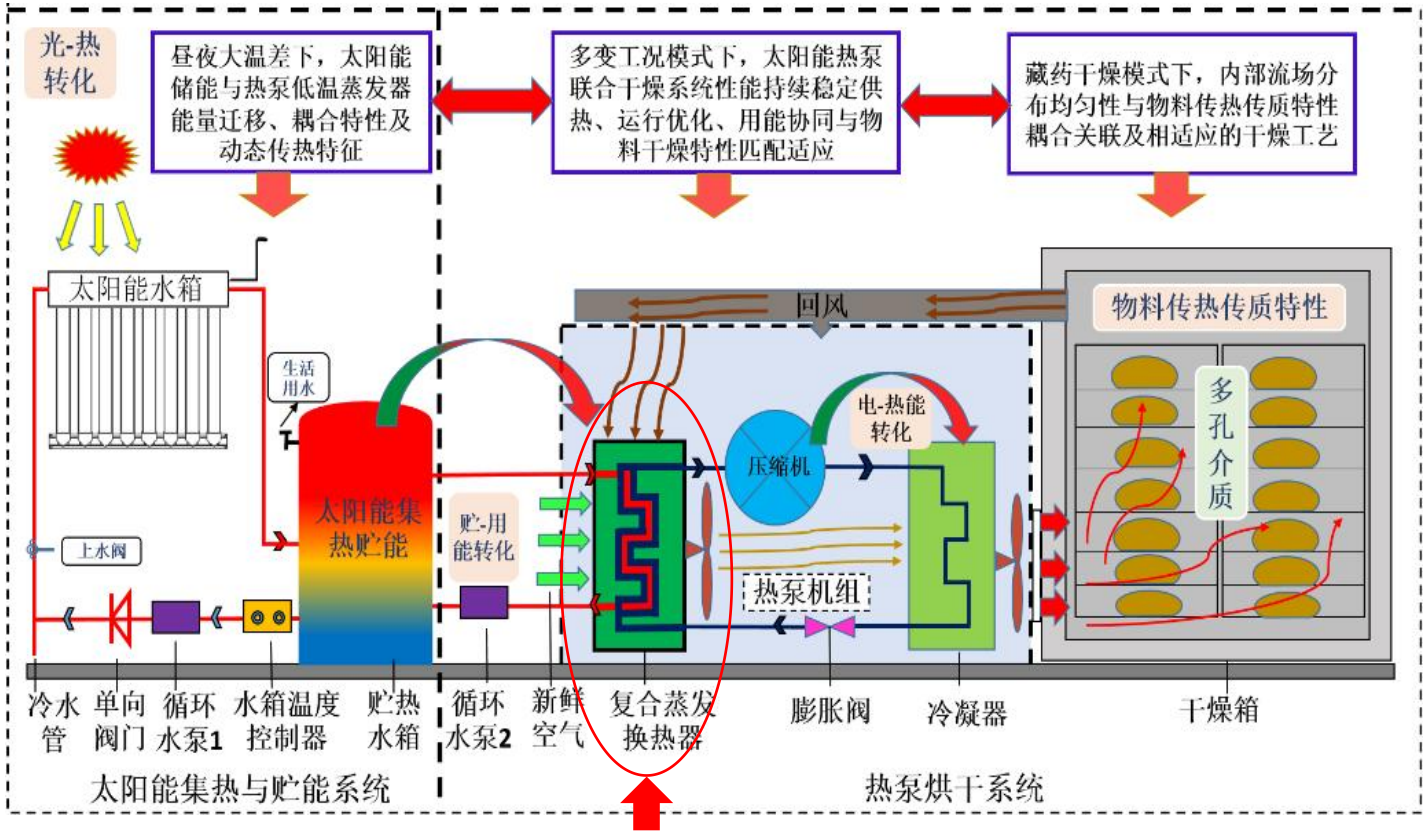
蒸发器结霜

在香格里拉藏区冬季采收季**日均环境温度低**，-5℃以下；**昼夜温差大**，约20℃。
冬季白天平均最高温度约为10℃，全天24h中，**5℃-10℃约7h**, 0℃-5℃约3h, **0℃以下约14h**。

白天（环境温度5~10℃），干燥箱内温度较**易维持 50℃以上**；
夜晚（环境温度-20~-5℃），热泵制热量随环境温度降低而衰减，**蒸发器结霜**，无法满足干燥内热量和温度需求。

结合藏区丰富的太阳能资源，提出太阳能补能与空气源热泵耦合干燥系统

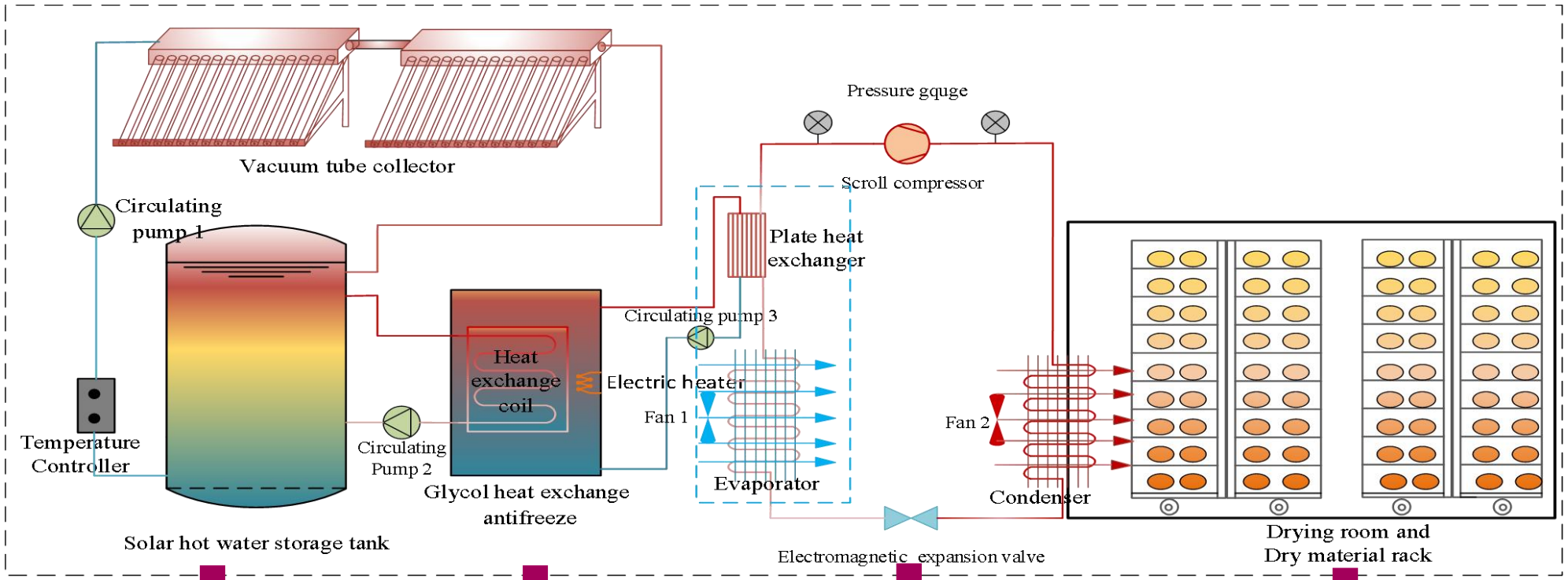




全年累计太阳辐照量6047MJ/㎡，属Ⅱ类太阳能资源丰富区，冬季平均日照时长约10h，日均累计太阳辐照量19.19MJ/(㎡·d)

1.白天环境温度高，太阳辐照强时，太阳能系统集热贮能；

2.夜间环境温度低，制热性能衰减时，贮能作为低温热源对热泵辅助补能。



在云南迪庆州香格里拉搭建了太阳能集热补能的热泵干燥测试平台

集热器面积27.9m²

储热水箱：3m³

压缩机：4.66kW

干燥箱装载量：2t

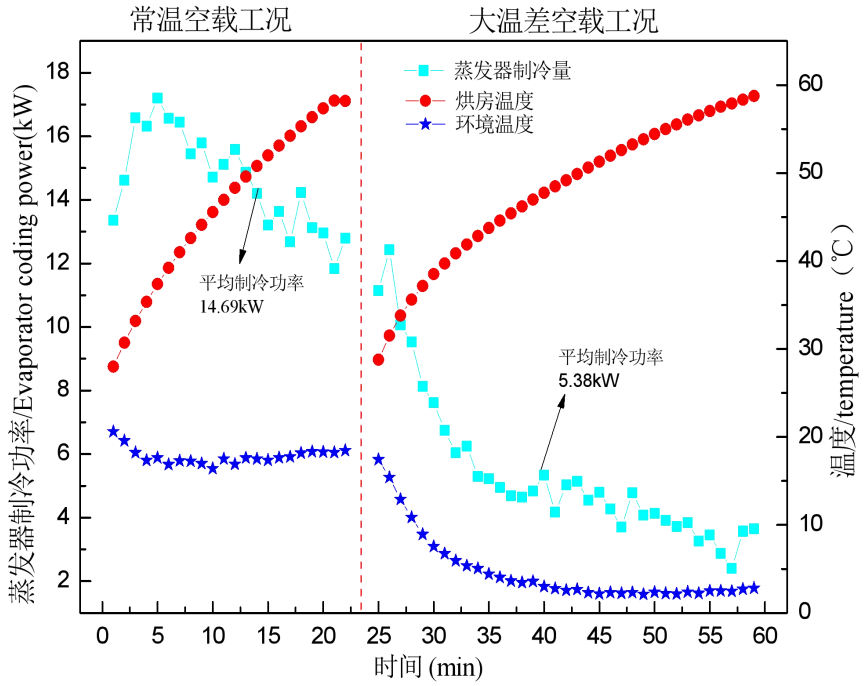
太阳能集热器集热贮能

太阳能热水与防冻液换热

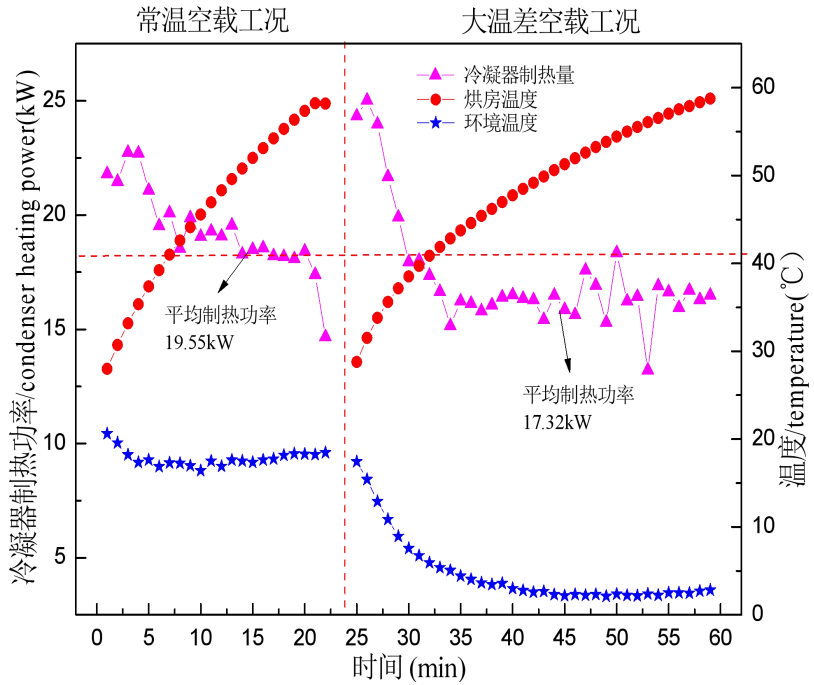
防冻液对制冷工质补能

干燥房物料用能

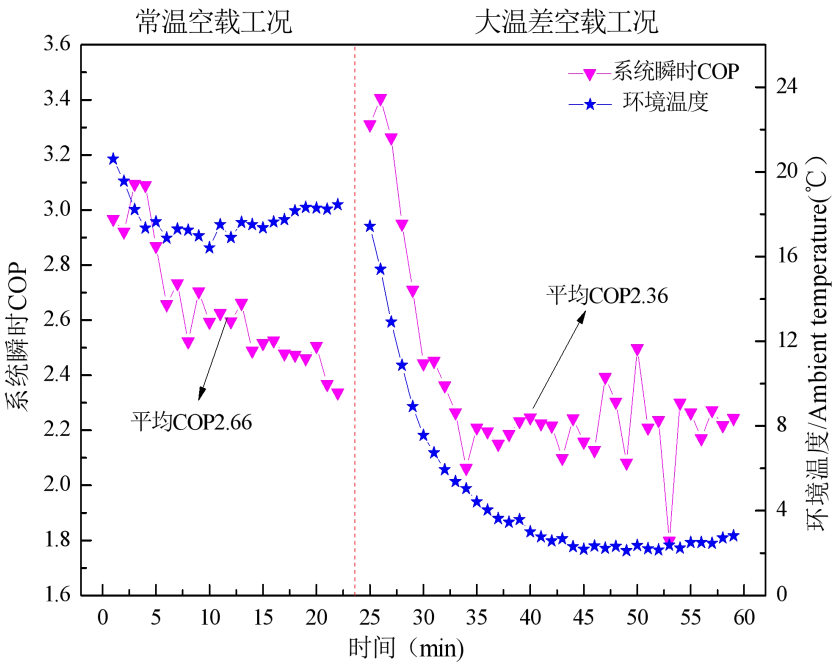
系统性能偏离特性实验研究结果：



蒸发器制冷功率衰减情况



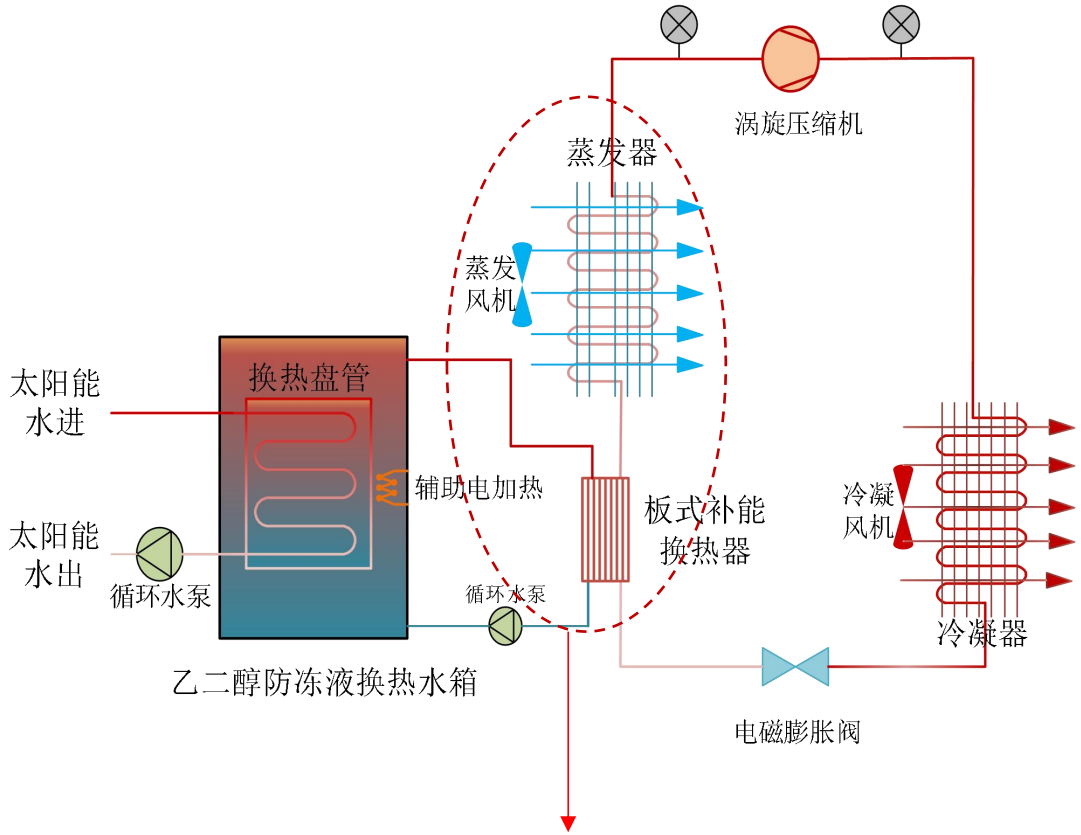
冷凝器制热功率衰减情况



系统COP衰减情况

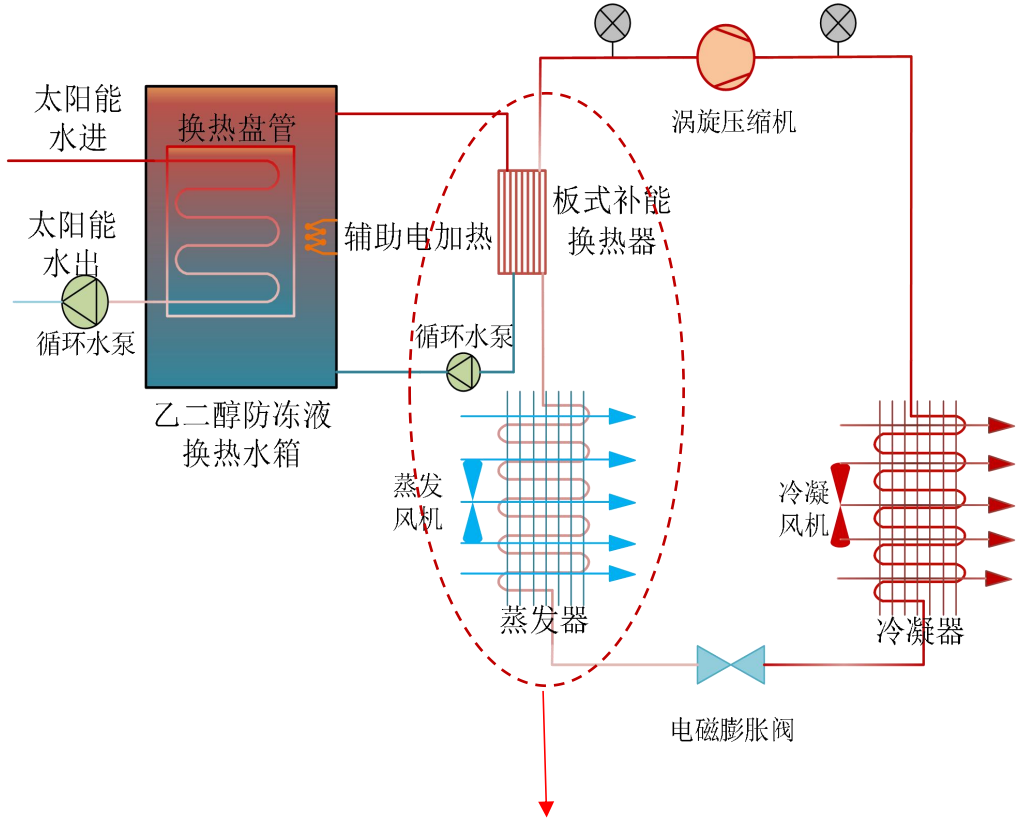
环境温度由17.43℃降至2.15℃的大温差工况下，将干燥箱内温度升高至相同设定温度，平均制冷量衰减63.38%，平均制热量衰减11.46%，系统平均COP衰减11.28%。

太阳能与热泵两种不同耦合补能方式：



板式换热器置于蒸发器之前补能

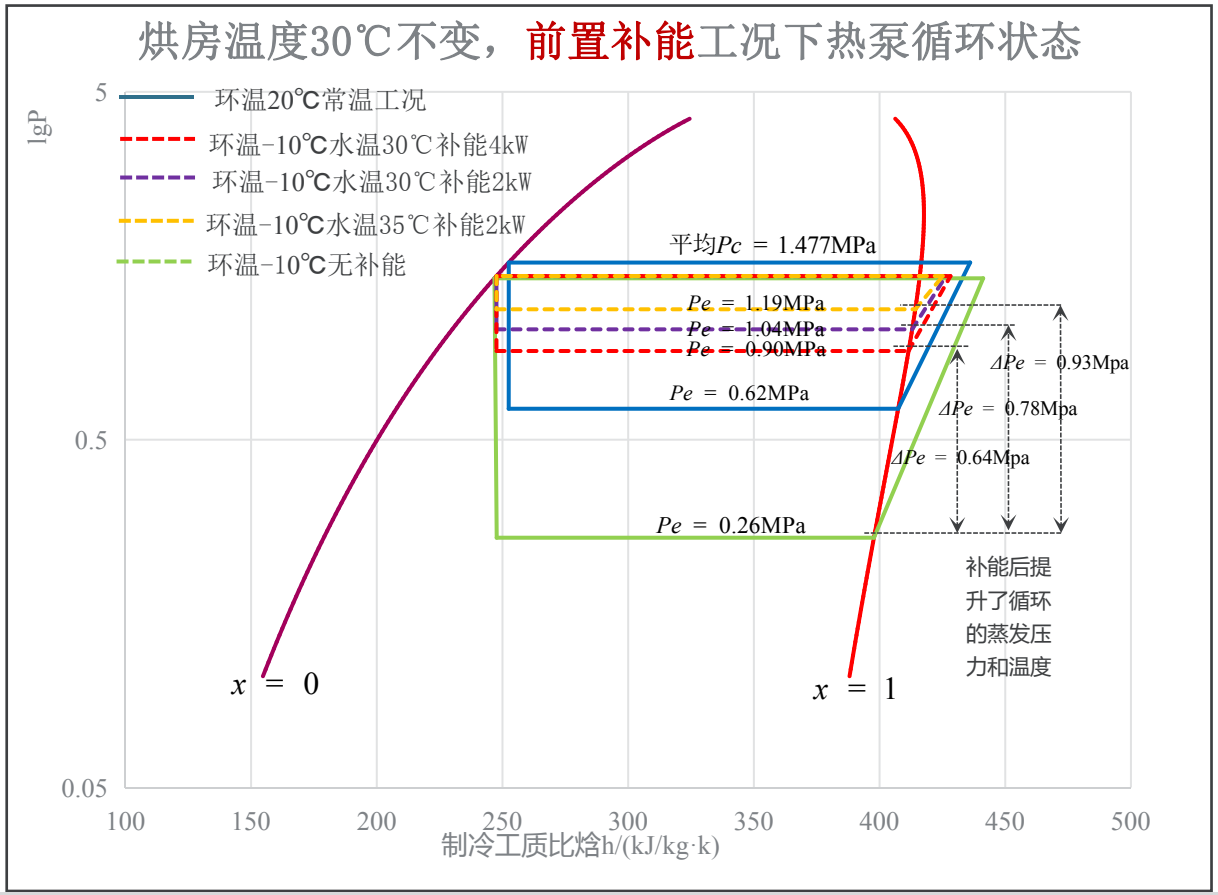
前置补能

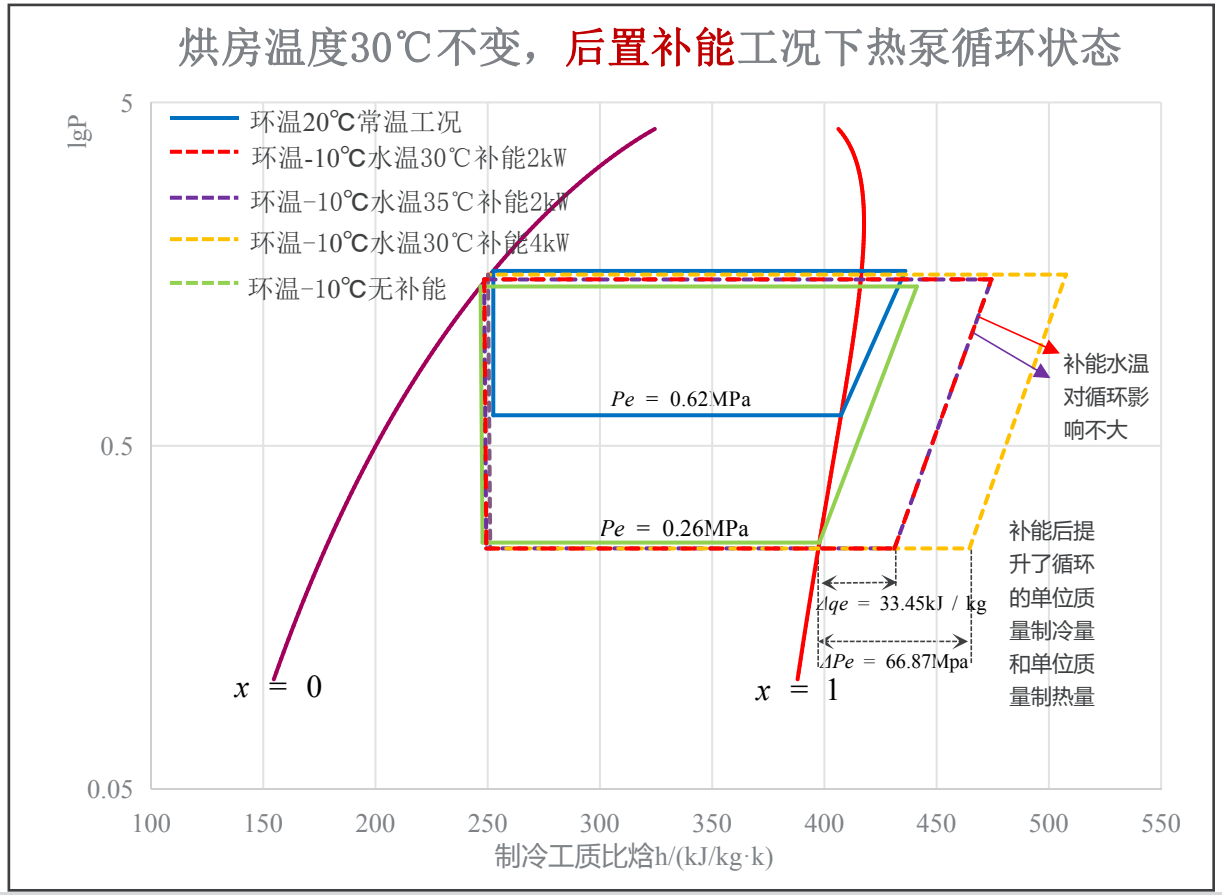


板式换热器置于蒸发器之后补能

后置补能

不同耦合补能方式对系统性能影响的理论分析结果

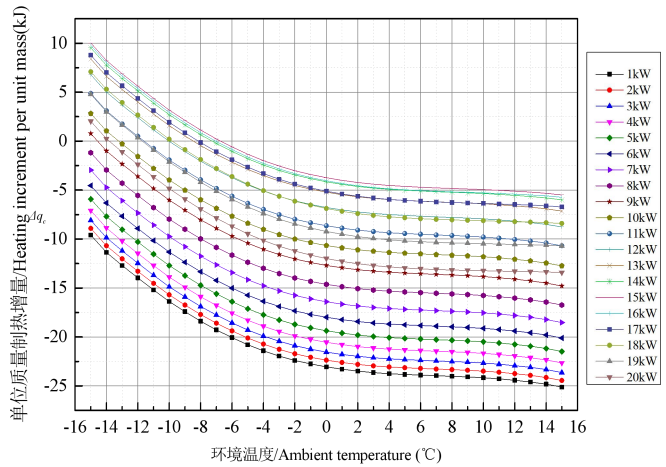




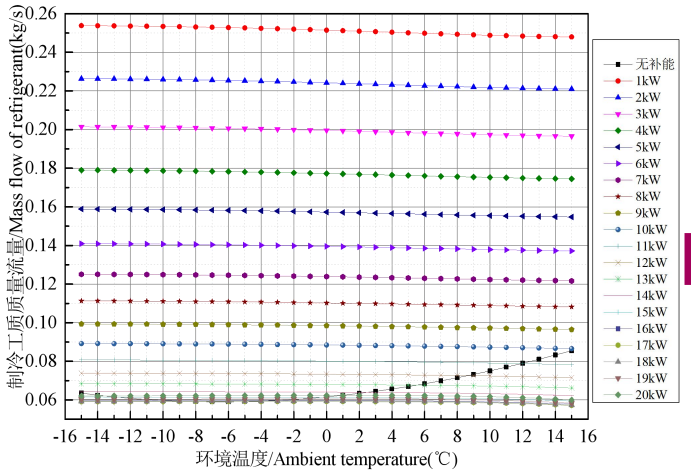
前置补能：补能后**蒸发压力和温度**提升，**质量流量增大，**且补能水温越高，蒸发压力和蒸发温度提升越大；
后置补能：补能后热泵循环的**单位制冷量和单位制热量**提升，**蒸发温度无明显变化，补能后性能提升效果随补能功率的增加而增大，与补能水温无关。**

不同耦合补能方式对系统性能影响的理论分析结果

前置补能



单位质量制热增量

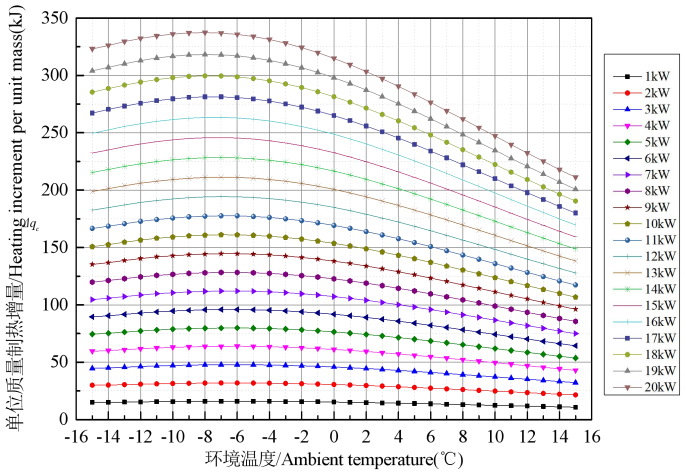


循环质量流量提升

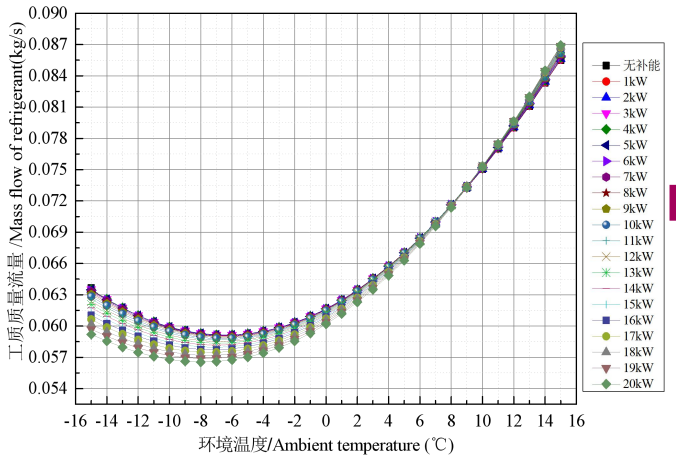
补能后单位制热量增量在-25~10kJ之间，平均增量为-10.07kJ，补能功率每增加1kW，单位制热量增加0.55kJ；

工质质量流量增量在-0.028~0.194kg/s之间，平均增量为0.044kg/s，增量与补能功率成负相关，补能功率每增加1kW，系统质量流量平均减少0.0002kg/s。

后置补能



单位质量制热增量

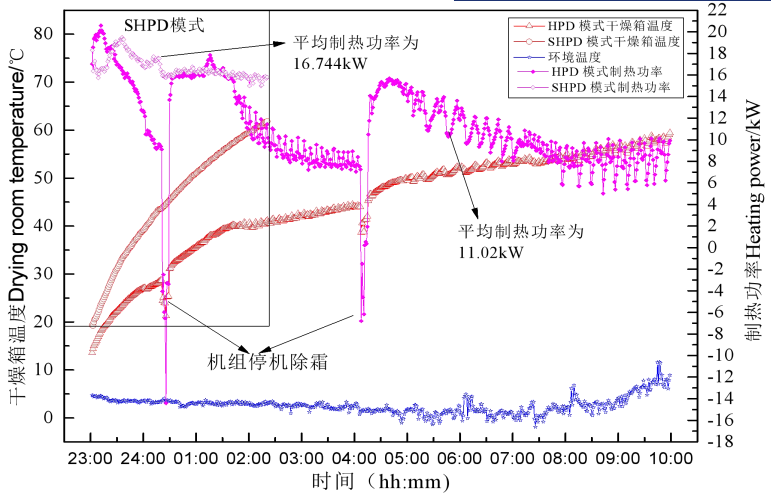


循环质量流量提升

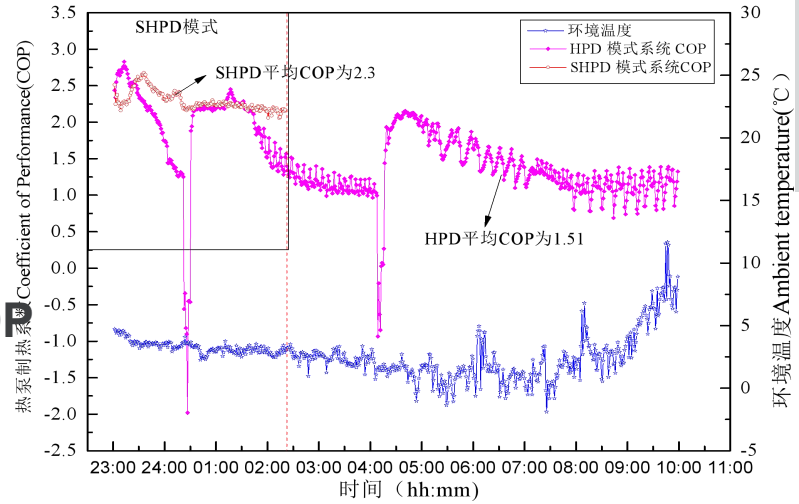
补能后单位制热量增量在0~350kJ之间，平均增量为152.96kJ，补能功率每增加1kW，单位质量制热增量增加14.863kJ；工质质量流量未显著提升。

不同耦合补能方式对系统性能影响的实验结果

制热功率



系统COP

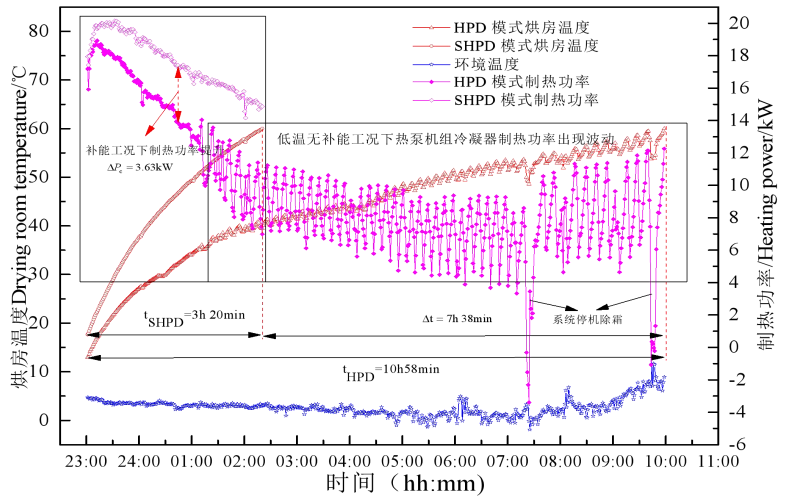


前置补能

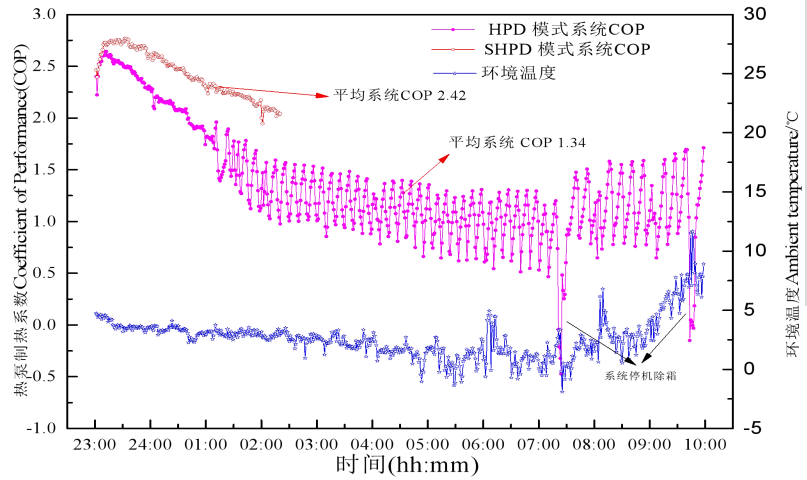
空载下，平均制热功率**提升54.78%**，系统平均COP**提升54.35%**；

负载下，平均制热功率**提升51.91%**，系统平均COP提升**52.32%**。

制热功率



制热功率



后置补能

空载下，平均制热功率**提升46.51%**，系统平均COP**提升46.20%**；

负载下，平均制热功率**提升59.89%**，系统平均COP**提升60.26%**。

均匀干燥与非均匀干燥的区别及特点分析

均匀干燥（实验室条件下）

干燥过程中干燥箱内干燥参数能够在**短时间**内达到设定值，且整个干燥过程物料所处的**边界条件不变**。

特点：

载物量少、环境温升快、干燥参数稳定

非均匀干燥（实际工况下）

吨级以上干燥箱负载大，升温缓慢，需要长时间才能上升至设定温度，箱内温度由环境温度逐渐上升至设定温度。

特点：

载物量大 、环境温升慢、干燥参数动态变化

研究内容

↓

不同干燥边界参数

温度　　相对湿度　　风速

↓

干燥失水速率

&

物料内部化学成分变化

↓

干燥品质

颜色、有效成分

农产品不同加工方法下干燥特性分析

切片

山柰 川木通
山楂 三棵针
山药 片姜黄
干姜 土茯苓
乌药 功劳木
地榆 皂角刺
佛手 鸡血藤
苦参 粉萆薢
狗脊 浙贝母
桑枝 绵萆薢
菝葜 紫苏梗
葛根 黄山药
竹茹 狼毒
桂枝 滇鸡血藤

切段

大血藤 小通草
肉苁蓉 青风藤
高良姜 益母草
颠茄草 野木瓜
桑寄生 槲寄生
钩藤 通草
黄藤 锁阳
铁皮石斛 广东紫珠
桃枝 首乌藤

切块

何首乌
茯苓块
商陆

切瓣

木瓜
化橘红
枳壳
枳实

随机

大黄 丁公藤
木香 天花粉
白蔹 两面针
防己 大腹皮
虎杖 香橼
粉葛

核桃

香菇

木耳

芭蕉干

辣椒

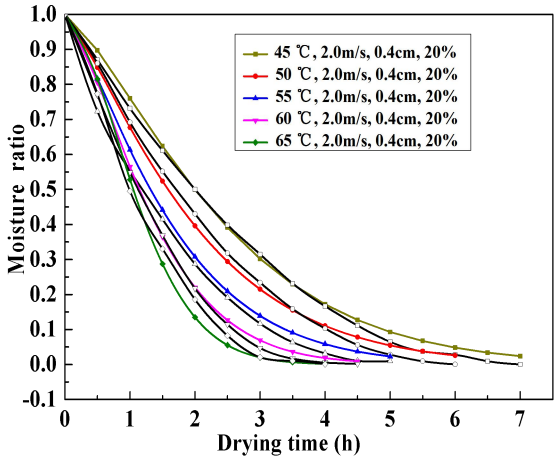
芒果条

红薯片

根茎类中药材干燥过程中失水模型的比较、选取与优化

通过对17组不同条件下均匀干燥过程中天麻干燥特性曲线分析，比较了7种模型下的干燥特性变化，得出预测天麻干燥的最佳模型为Page模型。

通过对秦艽、羌活、木香、当归等根茎类中药材干燥过程进行实验验证，证明了该模型具有一定的通用性。



天麻失水特性的影响

模型名称	模型方程
Page	$MR=\exp(-kt^n)$
Modified Page	$MR=\exp[-(kt)^n]$
Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+b$
Henderson and Pabis	$MR=a\exp(-kt)$
Diffision approximation	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$
Two-term	$MR=a\exp(-kt)+b\exp(-k_1t)$
Newton	$MR=\exp(-kt)$

干燥模型比较

最优干燥动力模型

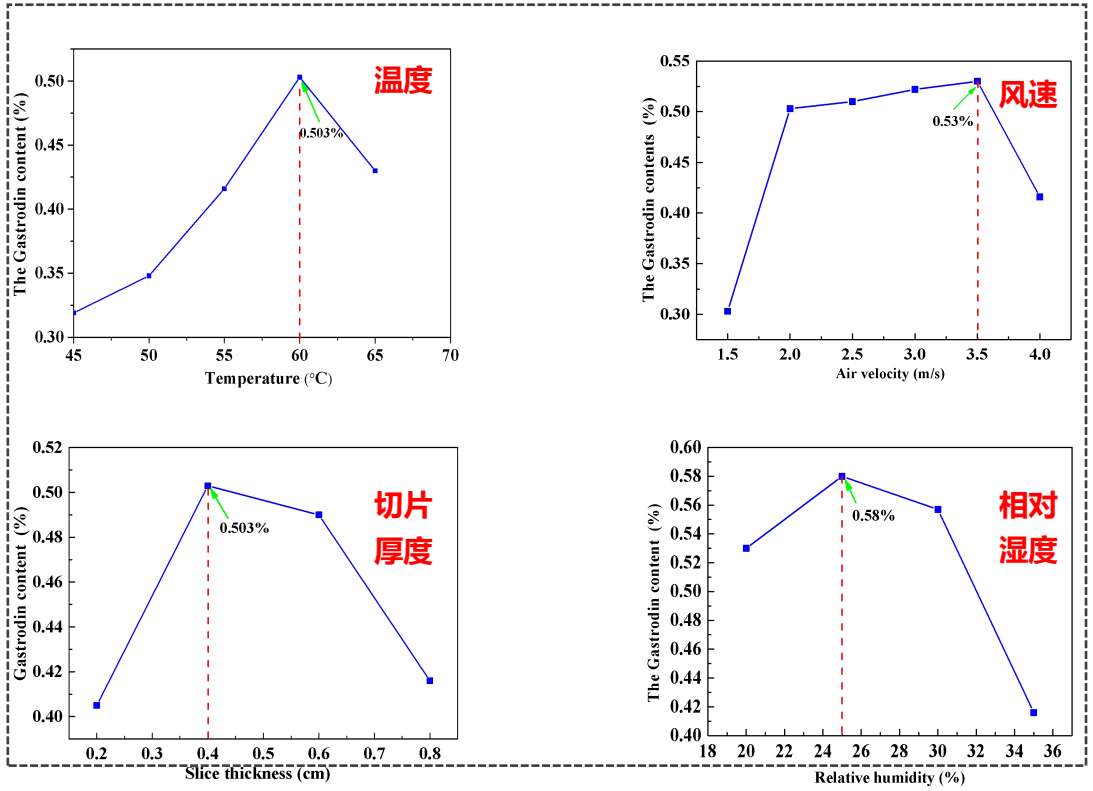
$$MR=\exp[(1.05074-0.01804T-1.77764V+0.45799V^2 \quad 1.85754-0.03572T+5.11093\times10^{-4}T^2 -0.19159V+0.03005V^2-0.00156V^3 +1.24418U-1.25262U^2-0.01382\varphi -0.03805V^3+0.68841U+0.08627\varphi-0.00126\varphi^2)t^{+3.15546\times10^{-4}\varphi^2}]$$

模型参数优化比较

干燥模型参数 K	R^2	干燥模型参数 n	R^2
$K=a_0+a_1T+a_2T^2+a_3T^3$	0.742	$n=a'_0+a'_1T+a'_2T^2+a'_3T^3$	0.967
$K=a_0+a_1T+a_2T^2$	0.841	$n=a'_0+a'_1T+a'_2T^2$	0.977
$K=a_0+a_1T$	0.849	$n=a'_0+a'_1T$	0.972
$K=a_0+a_1V+a_2V^2+a_3V^3$	0.992	$n=a'_0+a'_1V+a'_2V^2+a'_3V^3$	0.990
$K=a_0+a_1V+a_2V^2$	0.917	$n=a'_0+a'_1V+a'_2V^2$	0.977
$K=a_0+a_1V$	0.928	$n=a'_0+a'_1V$	0.921
$K=a_0+a_1U+a_2U^2+a_3U^3$	0.000	$n=a'_0+a'_1U+a'_2U^2+a'_3U^3$	0.000
$K=a_0+a_1U+a_2U^2$	0.690	$n=a'_0+a'_1U+a'_2U^2$	0.987
$K=a_0+a_1U$	0.768	$n=a'_0+a'_1U$	0.500
$K=a_0+a_1\varphi+a_2\varphi^2+a_3\varphi^3$	0.000	$n=a'_0+a'_1\varphi+a'_2\varphi^2+a'_3\varphi^3$	0.000
$K=a_0+a_1\varphi+a_2\varphi^2$	0.752	$n=a'_0+a'_1\varphi+a'_2\varphi^2$	0.881
$K=a_0+a_1\varphi$	0.714	$n=a'_0+a'_1\varphi$	0.832

均匀干燥下天麻（根茎类）的干燥品质对比分析

不同干燥参数对天麻素含量的影响



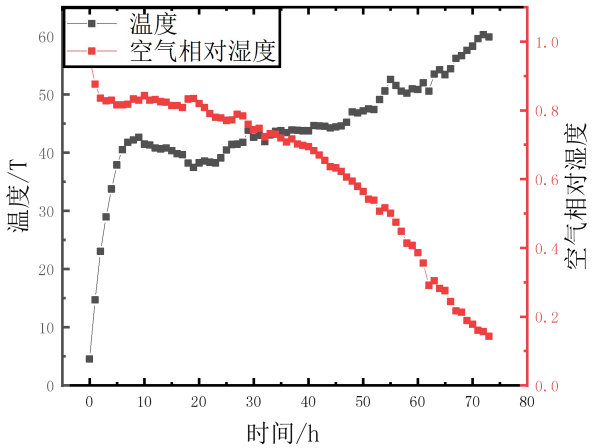
不同干燥参数干燥后天麻效果对比

对比了不同干燥参数对天麻素含量的影响及颜色特征，给出天麻**切片**的最佳干燥工艺，在此基础上使用其他根茎类药材验证，给出了**根茎类藏药**干燥最适合的工艺为**干燥温度55-60℃，相对湿度低于25%风速为2-3.5m/s**

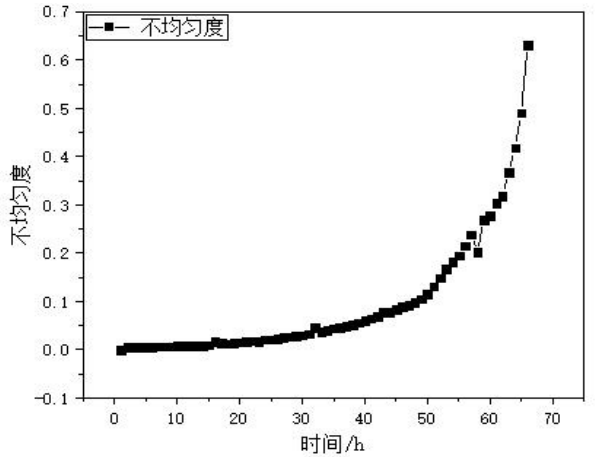
非均匀干燥过程中干燥箱温湿度及根茎类中药材的干燥特性分析

吨级中药材干燥速率整体呈上升趋势。箱内温度和湿度相互影响，相互制约。当相对湿度降至60%以下时，温升速率加快，箱内物料水分不均匀度快速增长。

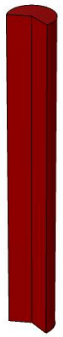
提出分段升温干燥方法，并建立变温干燥数学模型，解决吨级物料干燥过程长期处于非均匀干燥环境的问题。

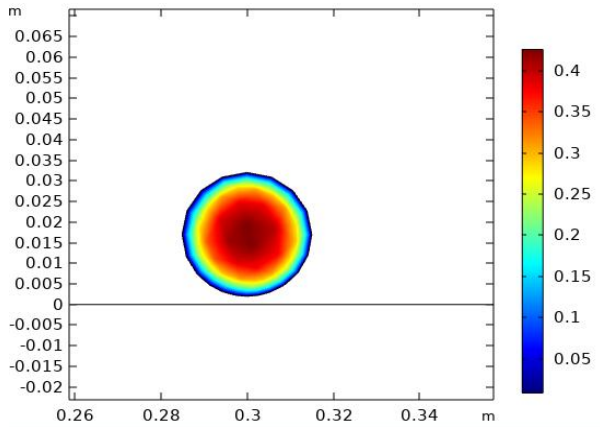


60℃干燥箱内温湿度变化

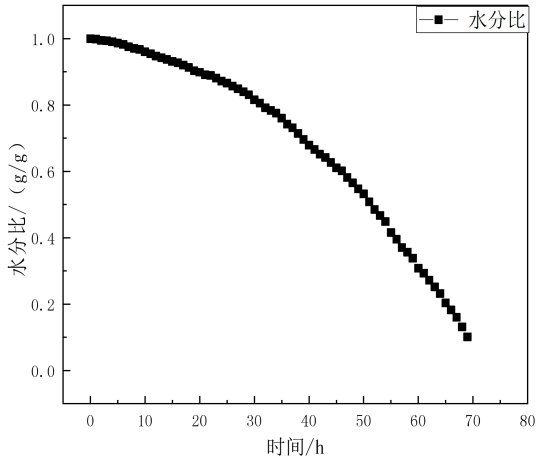


60℃下物料水分不均匀度

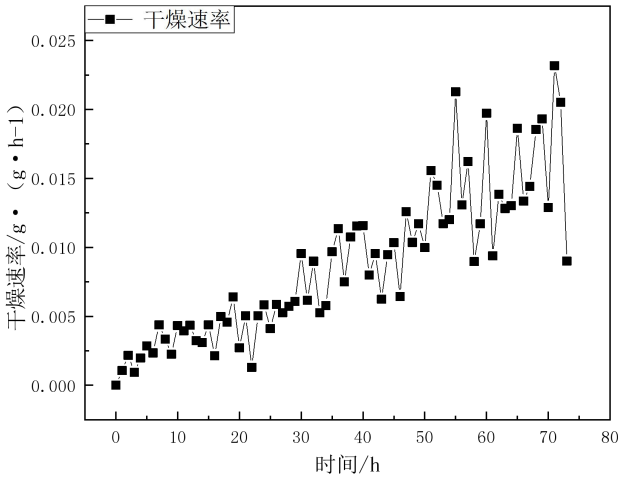




建立大载物量下的根茎类干燥传热传质模型



60℃下的失水特性曲线



60℃下物料干燥速率曲线

变参数干燥条件下均匀干燥与非均匀干燥的干燥周期及能耗的对比分析。

干燥方法	比热容 (J/(g℃))	热导率 (W/m℃)	色差	干燥时间(h)	耗电量 (Kw*h)
均匀条件下					
55℃	1.70	0.16408	1.79	26	57.4
50(5h)-55℃	2.06	0.162023	1.86	22	51.1
60(5h)-55℃	1.97	0.16848	1.78	20	46.1
非均匀条件下					
60℃	/	/	8.04	73	899.4
60℃-48h除湿	/	/	2.38	70	856.9
30℃-40℃-50℃-60℃（每阶段15h）	/	/	21.10	73	798.8
40℃（10h）-45℃除湿（38h）-60℃	/	/	13.21	60	768.7

太阳能干燥

太阳能热泵耦合干燥

变参数干燥可减少能耗，影响物料物性。与均匀干燥相比，**非均匀变参数**干燥下物料内**温湿度分布更均匀**。同时，该方法可使**干燥周期最高缩短21.66%，能耗最高降低20%。**

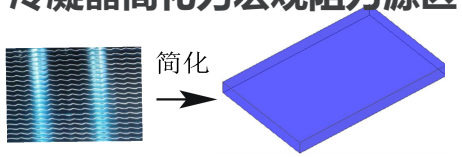
基于三维风扇区域模型和多孔介质模型建立干燥箱流场数值计算模型

干燥箱结构示意图

容积 ：44m³；
物料架数量：18；
物料盘数量：504；
循环风机数量：18；
冷凝器数量：2。

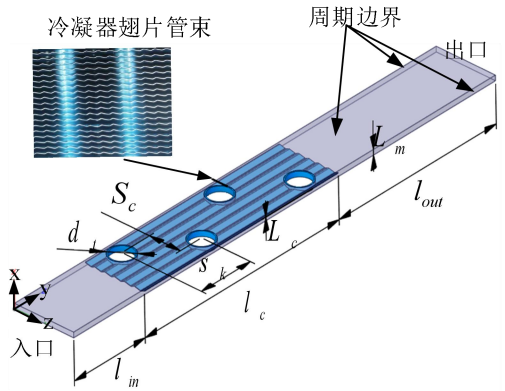
多孔介质模型

冷凝器简化为宏观阻力源区



$$\Delta P_i = \frac{\mu}{\alpha}\Delta n v_i + \frac{1}{2}C_2\rho\Delta n|v|v_i$$

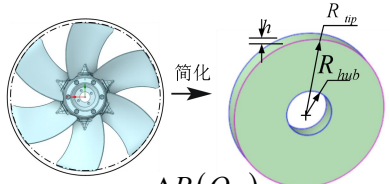
$$\Delta p = au_{fr} + bu_{fr}^2$$



冷凝器空气侧阻力特性数值计算模型

三维风扇区域模型

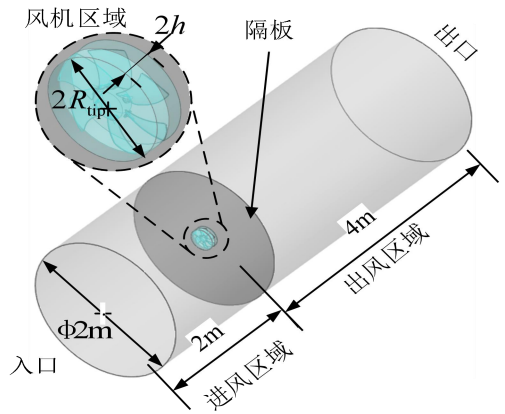
循环风机简化为圆环主体



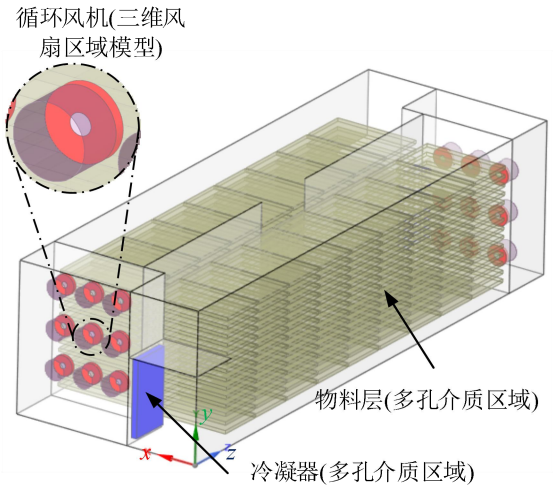
$$S_a = \frac{\Delta P(Q_{in})}{h}$$

$$S_t = \begin{cases} \dfrac{2W_{fan}r}{c|\Omega_{operating}|} & R_{hub} < r \le R_{ip} \\ \dfrac{2W_{fan}R_{iP}^2}{cr|\Omega_{operating}|} & R_{ip} < r < R_{tip} \end{cases}$$

$$S_r = \frac{\rho u_t^2}{r}$$



循环风机气动性能数值计算模型

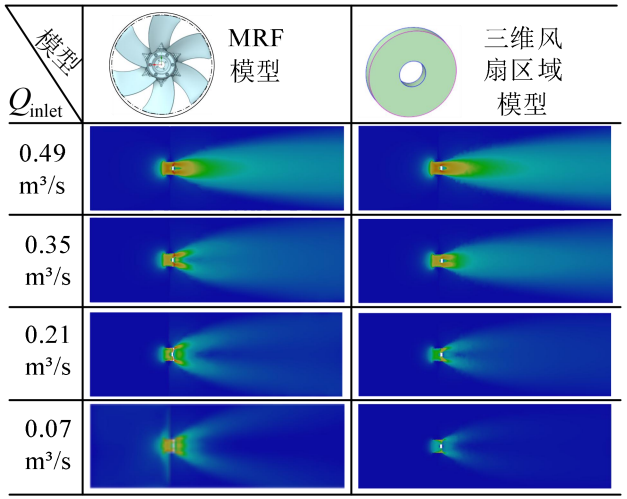


干燥箱数值计算模型

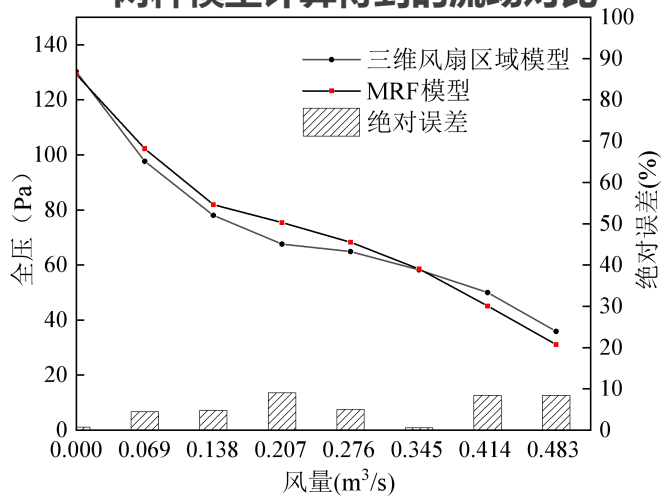
$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot\left(\rho\vec{v_r}\right) = 0$$

$$\frac{\partial\left(\rho\vec{v}\right)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{v_r}\vec{v}) + \rho\left[\vec{\omega}\times(\vec{v}-\vec{v_t})\right] = -\nabla P + \nabla\vec{\tau} + \vec{F}$$

三维风扇区域模型有效性分析



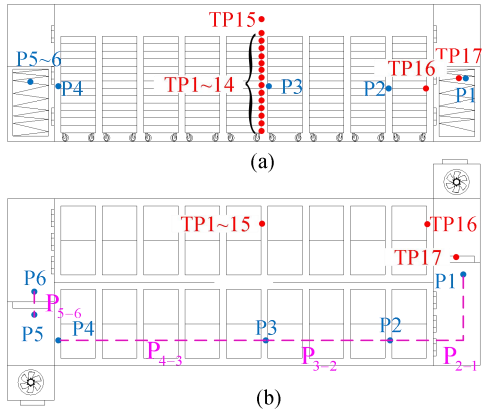
两种模型计算得到的流场对比



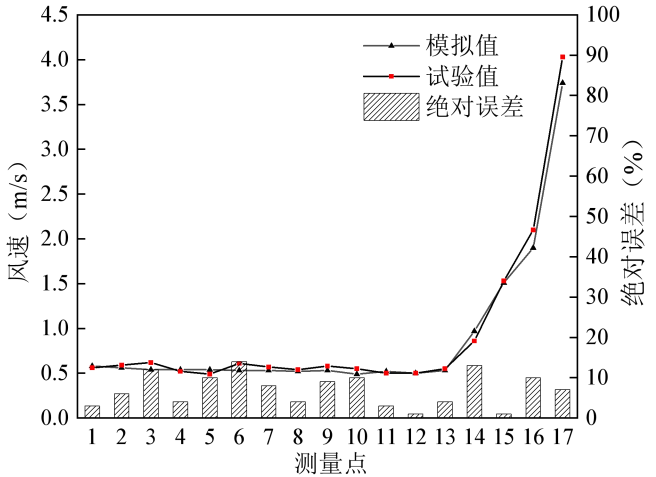
两种模型计算得到的全压值对比

新模型风机区域网格数量仅为MRF模型的1.12%，且模拟的结果与MRF模型的结果一致。

干燥箱数值计算模型实验验证



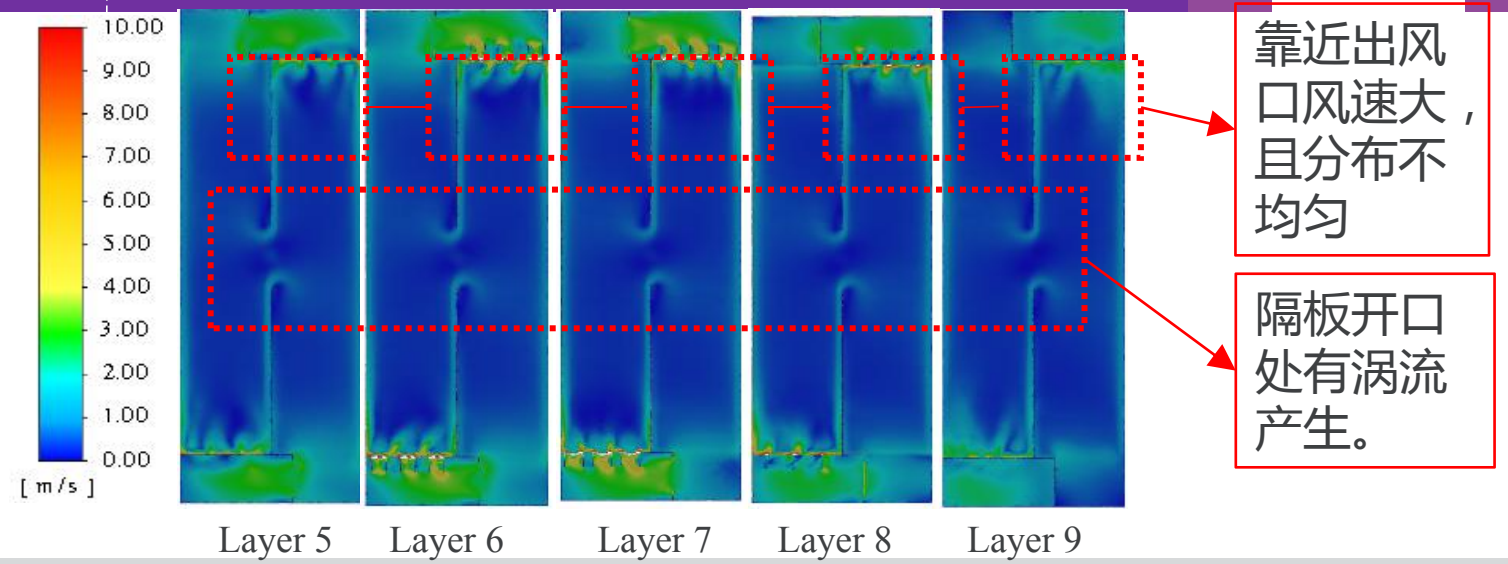
藏药干燥实验



实验值与模拟值对比

模拟值与试验值具有很好的相关性，平均相对误差为6%，满足干燥箱数值模拟精度要求。

干燥箱流场分析

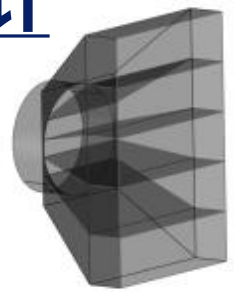


靠近出风口风速大，且分布不均匀

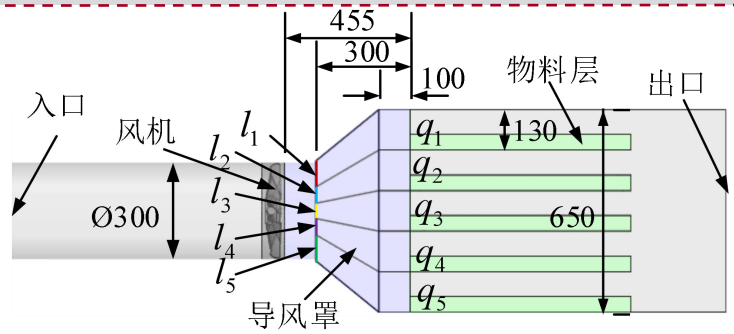
隔板开口处有涡流产生。

均匀性指数约为0.7，均匀性较差。
如何使出风口气流均匀地流向各层物料盘，是提高干燥箱整体流场均匀性的关键。

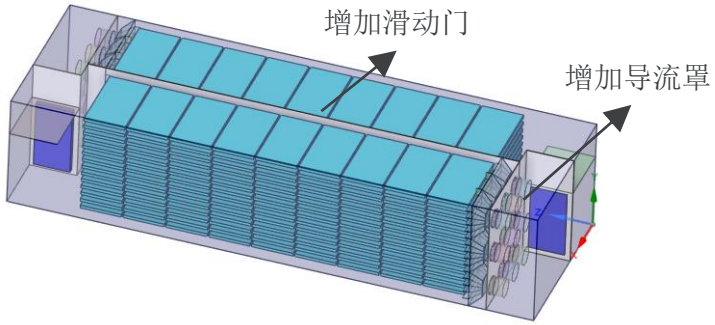
优化设计



导流罩设计



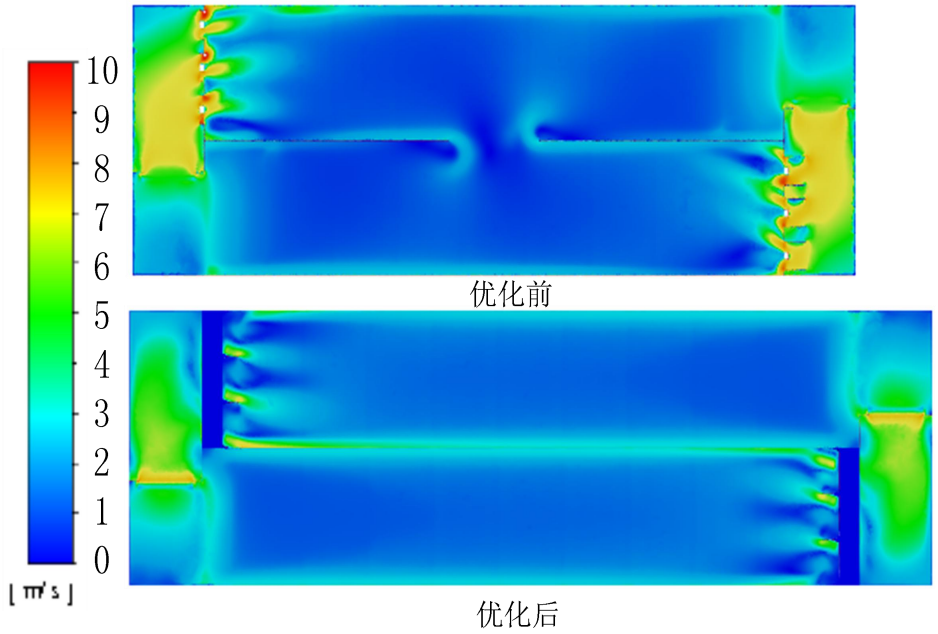
导流罩风量分配数值计算模型



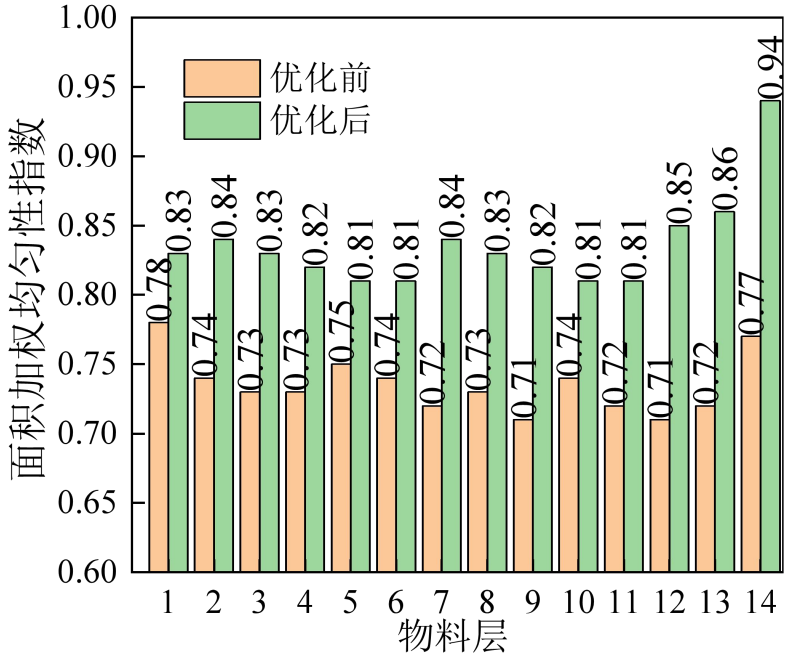
优化后的干燥箱结构示意图

指导优化方案：减少干燥箱顶面与最上层物料盘之间的距离、增加推拉门，并在每个出风口增加一个导流罩。

优化后的干燥箱流场分析



优化前后的干燥箱风速云图对比

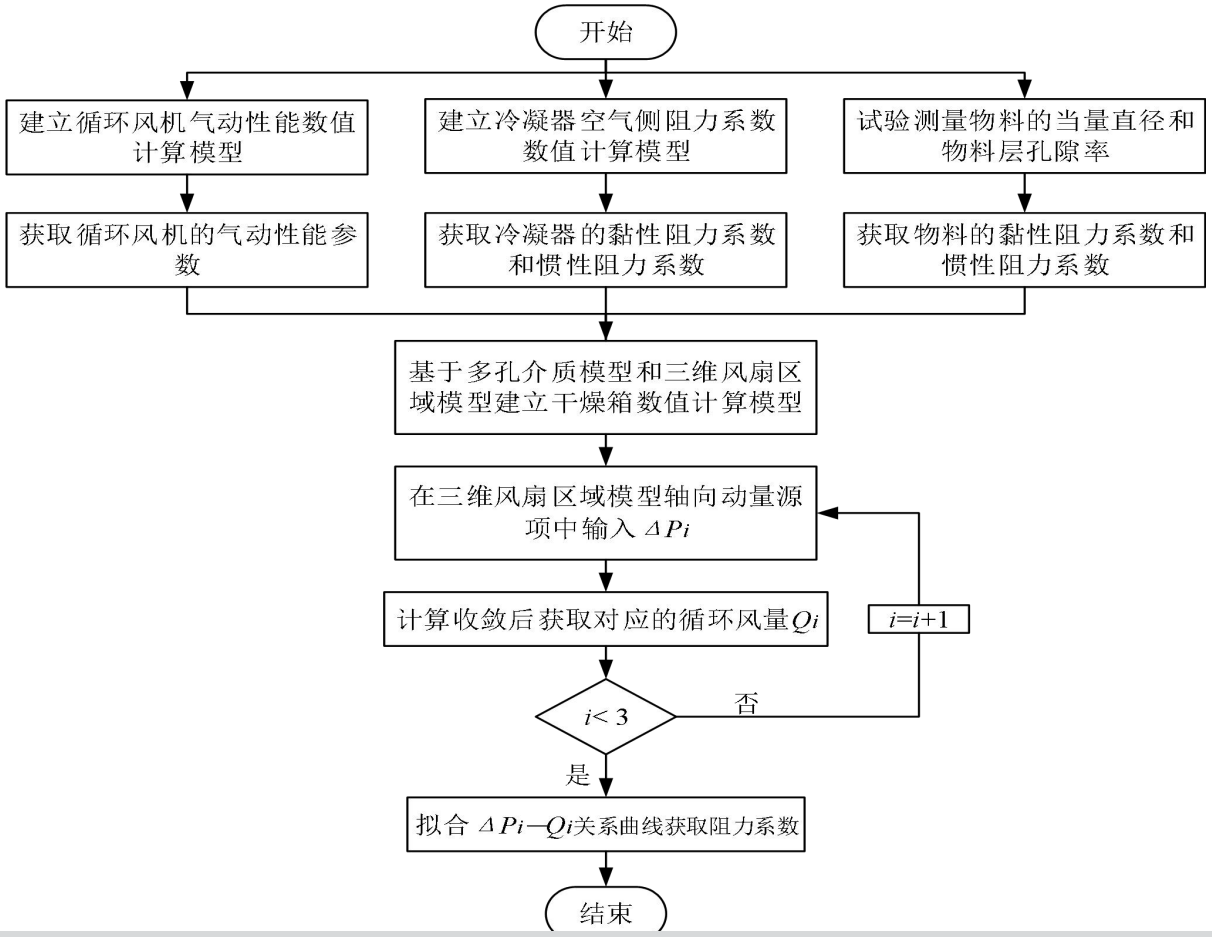


优化前后的均匀性指数对比

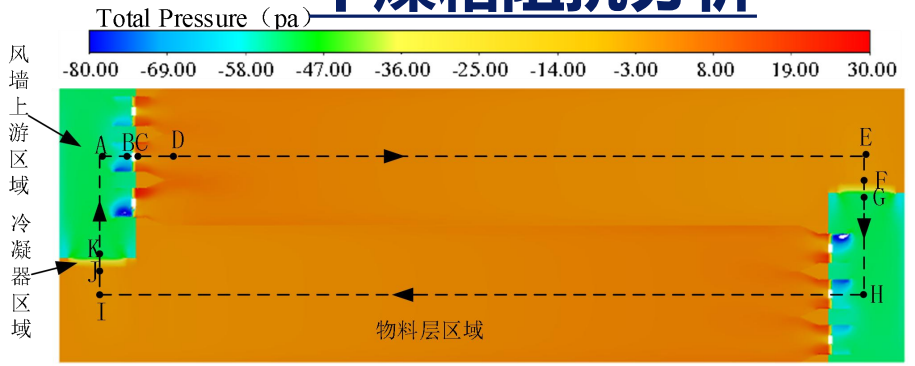
各层的均匀性指数都有不同程度的提高，所有物料层的**均匀性指数约为0.85**，较原结构**提高了15%**。

但流过物料风速仅为0.83m/s，不满足干燥工艺风速要求（2~2.5m/s），**循环风机与系统阻力仍需进一步匹配**。

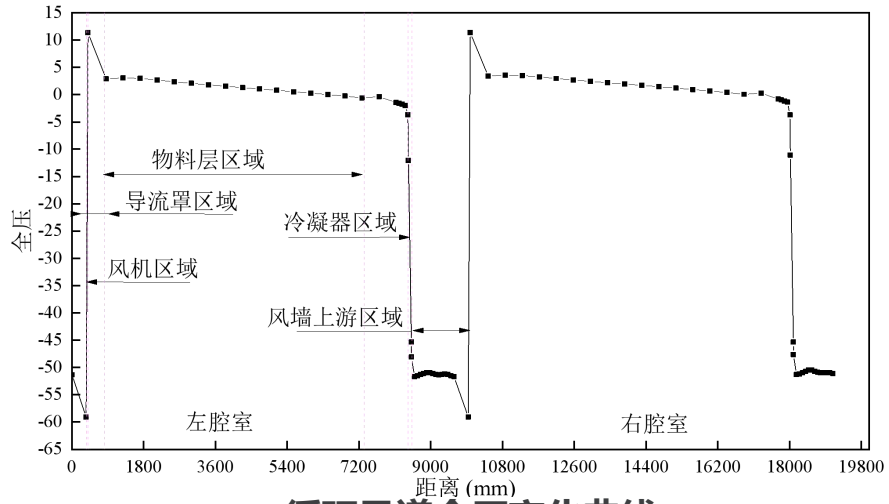
干燥箱系统阻力计算方法



干燥箱阻抗分析



干燥箱全压分布云图

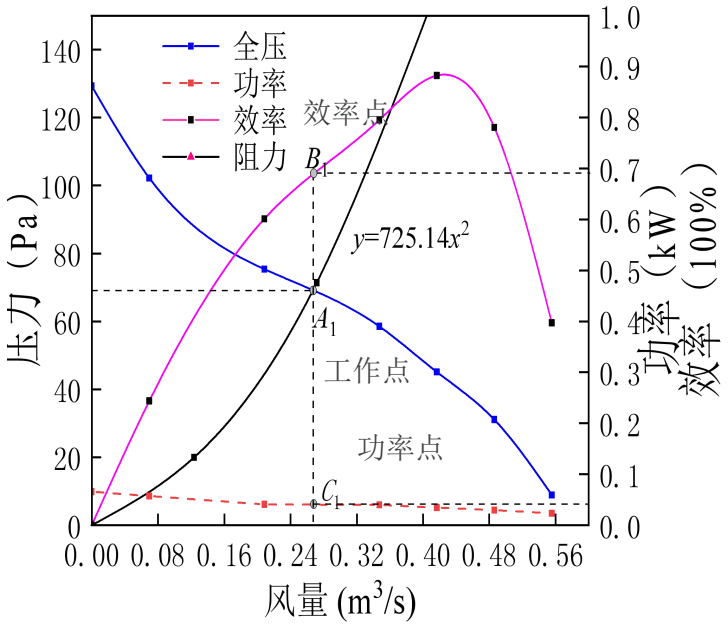


循环风道全压变化曲线

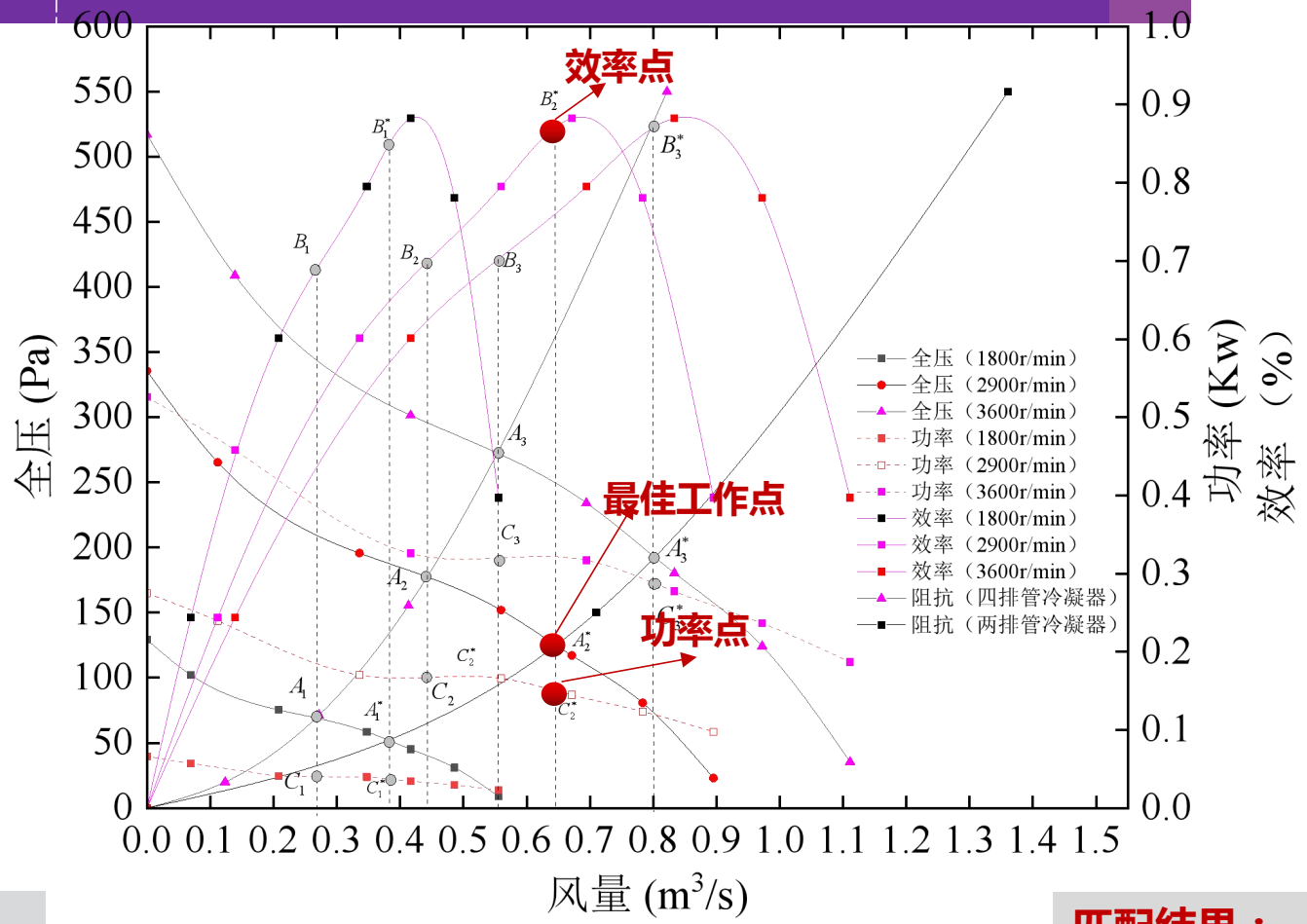
基于三维风扇区域模型和多孔介质模型建立计算干燥箱系统阻力的数值计算模型

冷凝器翅片管束是干燥箱循环风道的主要阻力，占系统阻力的比重达59%。

干燥箱结构影响



干燥箱循环风机工作点



问题：

（1）循环风机的工作效率约70%，风机运行效率低。

（2）物料层上方风速0.83m/s，低于藏药干燥工艺要求

匹配方法：

（1）将四排管冷凝器更改为双排管冷凝器、增加迎风面积；

（2）根据风机相似定律，改变风机转速。

匹配结果：

冷凝器为两排管且风机转速为2900r/min时物料盘上的平均风速为2.01m/s，满足藏药干燥工艺要求，且风机效率提升了15%。

共向未来

我们对太阳能干燥系统、热泵干燥系统、太阳能与热泵联合干燥系统有了较深入的理解，对系统的热物理性质和传热传质特性有了一定的理论和实验基础。

下一阶段期望与热利用企业一起推进太阳能干燥产业的优化升级，提高农业产品干燥规模化、标准化、绿色化、品牌化水平。

感谢

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟
中国科学院电工研究所
内蒙古旭宸能源有限公司
北京天瑞星光热技术有限公司
成都禅德太阳能电力有限公司

汇报人：李明