

第八届轻型商用制冷技术产学研融合会议
暨《2022年中国轻型商用制冷产业发展蓝皮书》发布仪式



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

轻商制冷设备用柔性密封条 热湿传递特性及性能提升

刘国强

西安交通大学
制冷与低温工程系

2023年04月09日

中国·上海



1

柔性密封条应用及研究背景

2

热湿传递性能评价测量技术

3

动态工况下的热湿传递特性

4

柔性密封条性能提升的案例

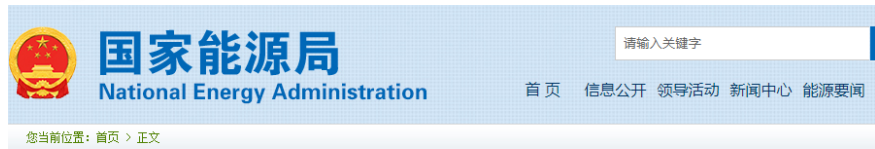
5

柔性密封技术未来发展方向

报告提纲



一、柔性密封条应用及研究背景—冷链物流:节能减排



2022年全社会用电量同比增长3.6%

发布时间: 2023-01-16

来源: 国家能源局

大 中 小

1月16日, 国家能源局发布2022年全社会用电量等数据。

2022年, 全社会用电量86372亿千瓦时, 同比增长3.6%。分产业看, 第一产业用电量1146亿千瓦时, 同比增长10.4%; 第二产业用电量57001亿千瓦时, 同比增长1.2%; 第三产业用电量14859亿千瓦时, 同比增长4.4%; 城乡居民生活用电量13366亿千瓦时, 同比增长13.8%。

- **国家能源局发布2022年全社会用电量: 86372亿千瓦时, 同比增长3.6%;**
- **我国是全球最大的制冷产品生产、消费和出口国, 制冷用电量占全社会用电量15%以上。**



- **为助力实现碳达峰、碳中和目标, 国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》, 明确提出: 实施绿色高效制冷行动, 以冷链物流等为重点, 更新升级制冷技术、设备。**



一、柔性密封条应用及研究背景—应用场景: 民用、军工

家用制冷设备



上下开门冰箱



对开门冰箱



十字开门冰箱



立式冷柜



卧式冷柜

精密环境试验箱



恒温恒湿
试验箱



高低温
试验箱



快速温变
试验箱



冷热冲击
试验箱

轻商制冷设备



食品展示柜



葡萄酒储藏柜



厨房冷柜



饮料储藏柜

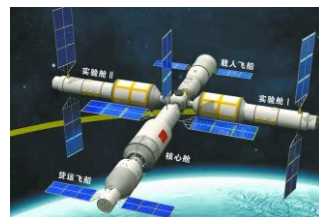


自动售货机

特种设备机舱



民用飞机舱门



空间站用密封 (航天四院供图)



车载冰箱



便携式药品箱



医用冷藏柜



医用低温冷柜

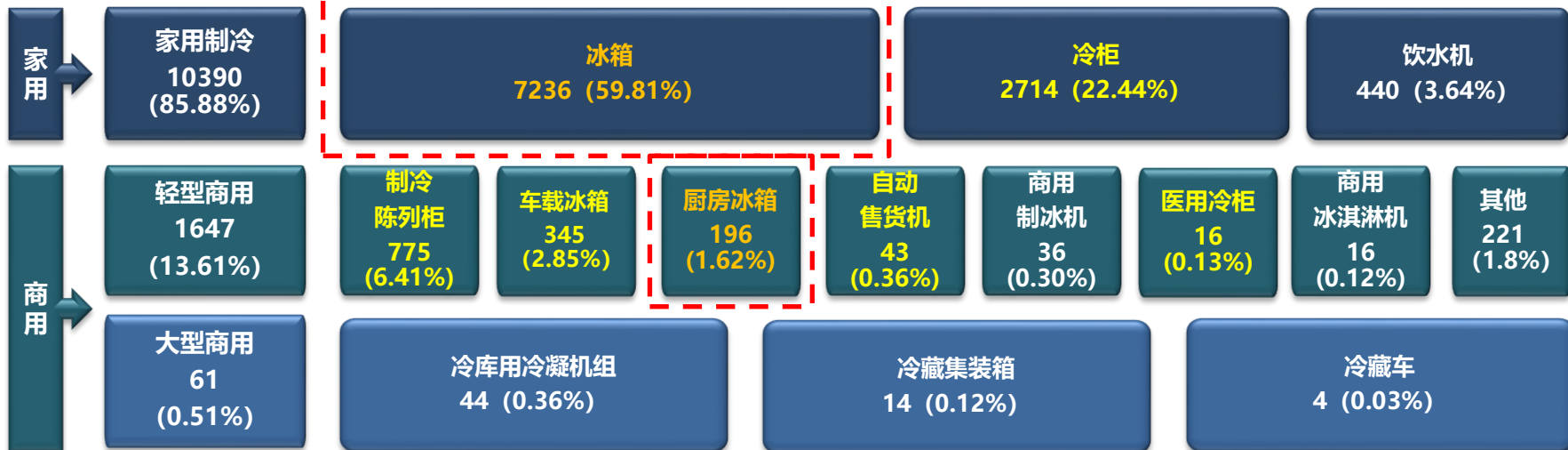


立式弧形展示柜



一、柔性密封条应用及研究背景—行业需求:市场规模大

2022年制冷设备整体销售量 (万台/占比)



- ◆ 家用制冷场景下，冰箱与冷柜 (9950万台/82.25%) 的柔性密封条需求量非常大；
- ◆ 商用制冷场景下，大部分轻型商用制冷设备 (如厨房冰箱、葡萄酒储藏柜、食品展示柜、饮料冷藏陈列柜等，1375万台/11.37%) 也采用柔性密封条进行密封。

按照50%内销市场估算，密封条性能提升使制冷设备能耗下降3%，预计年节电量约3.8亿 kWh，碳排放下降潜力2000万吨/年以上，可有效推动我国冷冻冷藏行业节能减排。



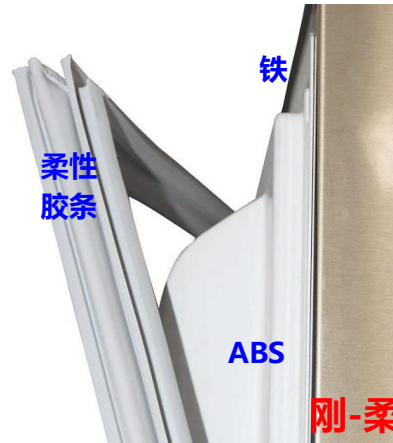
一、柔性密封条应用及研究背景——密封功能：以冰箱为例



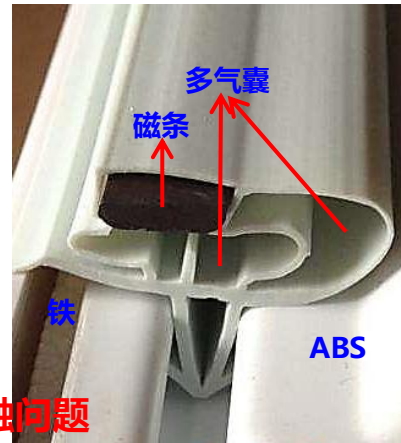
上下开门冰箱



对开门冰箱



局部外观



剖面形状

刚-柔接触问题

- ◆ 冰箱使用过程中，用户有开关门需求，箱体与门体存在局部分离与闭合两个工况；
- ◆ 关门工况需起到绝热与密封作用，用户开门工况需操作简单、易于开门。



密封条设计为：柔性胶条、多个气囊、磁条吸合



一、柔性密封件应用及研究背景—能耗占比:与设备类型有关

• 密封条热负荷占比测算

研究人员	制冷箱体容积	热负荷值及占比
Ghassemi (1993)	566 L	3%~5%
Hessami (1997)	370 L	14.10 W, 13.0%
Melo (2000)	230 L	1.26 W, 3.0%
	230 L	1.13 W, 2.7%
Tao (2001)	460 L	10.85%~18.5%
Hessami (2003)	\	15.7 W, 13.0%
Huelsz (2011)	283 L	5.4 W, 15.3%
马长州(2012)	210 L	7.86%~13.52%
Thiessen (2014)	429 L	5.7 W, 8.8%
Liu (2020)	535 L	13.1W, 20.2%

- 采用反向热平衡法估测
- 密封条热负荷占比2.7%~20.2%，占比大小影响因素：

与胶条结构型式有关

与卡槽接口结构有关

与门封装配效果有关

与门封材料有关

与冰箱容积有关

与间室设置型式有关（十字开门、对开门等）

.....

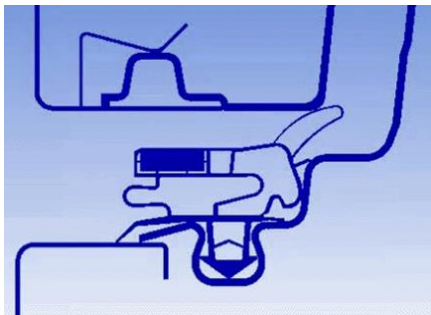
- 密封改进对设备的节能潜力分析：

实体门设备，常对密封进行结构、材料综合改进，其本身绝热性能可提升30%以上，若密封部位热负荷占比20%，设备热负荷可下降6%以上。

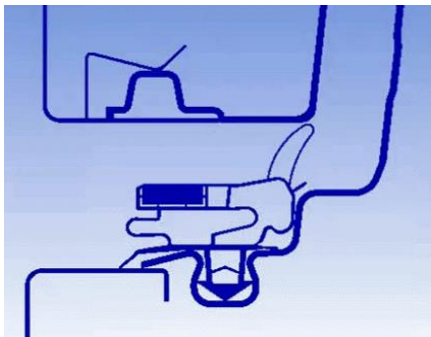
玻璃门设备，密封部位热负荷占比4%~6%。

一、柔性密封件应用及研究背景—装配特点:刚-柔接触问题

胶条发生弹性形变



拉伸形变工况



挤压形变工况

加工偏差导致装配间距尺寸不均匀



紧密贴合



门体顶部挤压形变

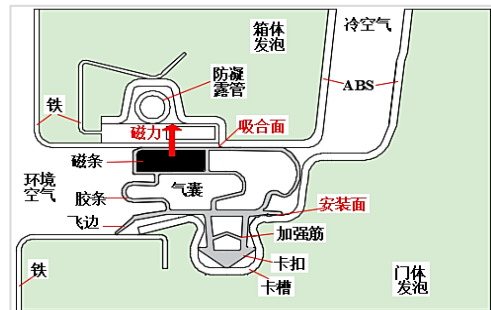


辅助飞边脱离门体外壳

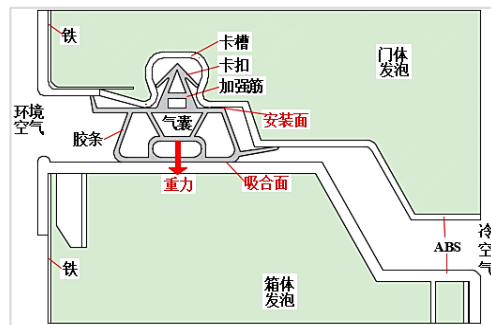


辅助气囊脱离门体内衬

热湿传递路径复杂



磁力式密封



重力式密封

一、柔性密封件应用及研究背景—凝露结霜: 水分迁移问题

密封条绝热及密封性差极易引起湿空气相变发生凝露结霜，造成客户投诉率高



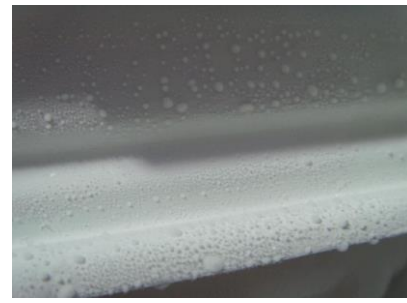
门封凝露



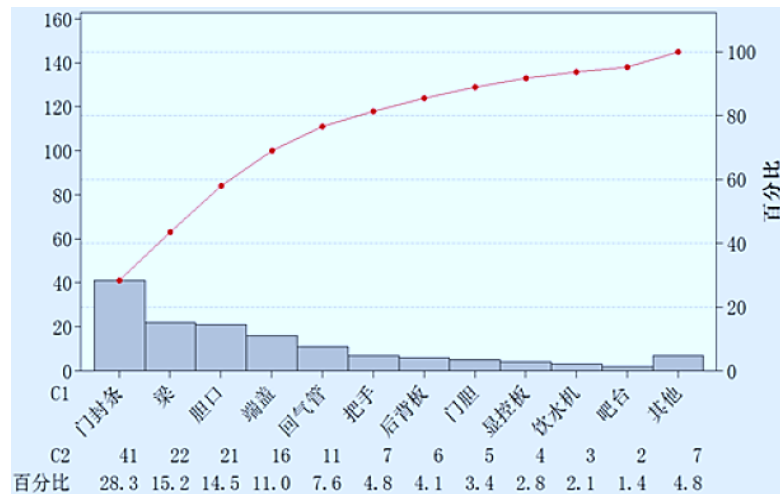
内胆凝露



门体凝露



玻璃门凝露

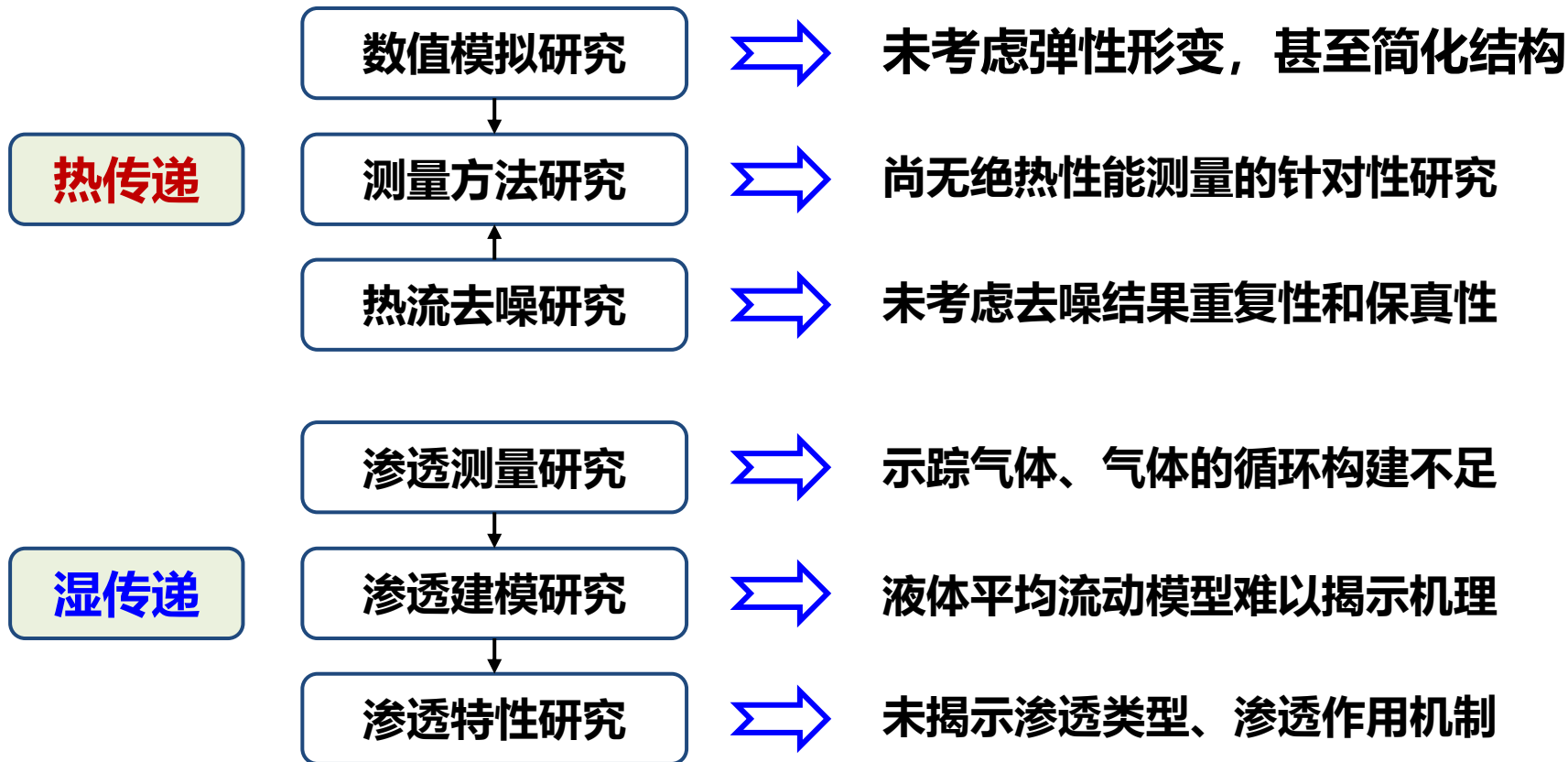


凝露结霜位置及频率调研

密封条及其相关的梁、胆口排前三

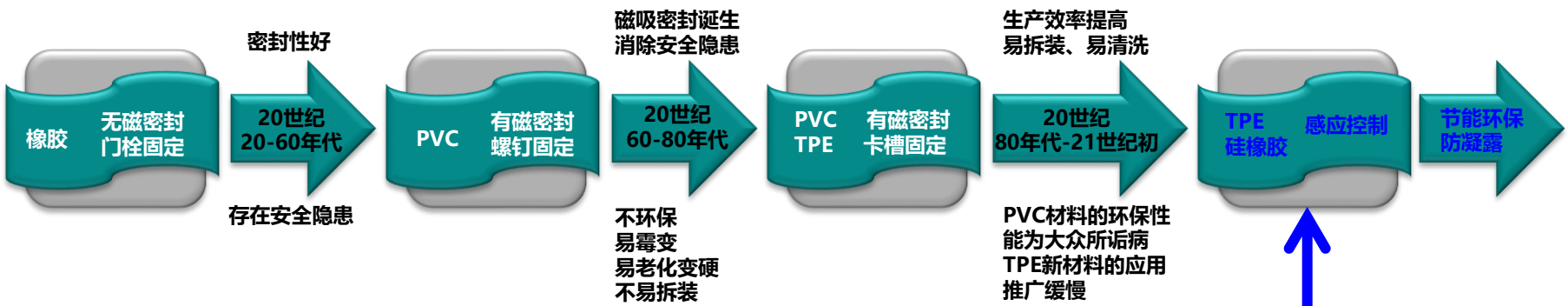


一、柔性密封条应用及研究背景—学术现状: 无系统性研究





一、柔性密封条应用及研究背景—技术现状:底层技术缺乏



冷链设备密封技术迭代路线：1920年~至今

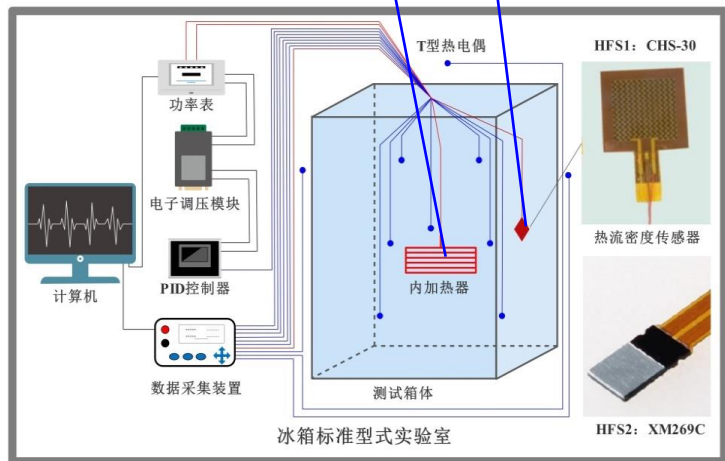
需突破三个关键性行业技术难题



二、热湿传递性能评价测量技术—绝热性能测量技术

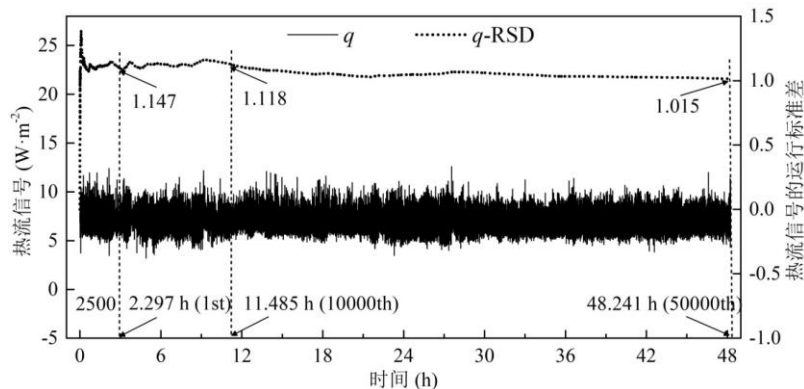
问题：热泄漏系数 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) 测量，壁面小热流信号存在噪声波动，壁面测点分布

$$Q_{\text{wall}} = \sum_{j=1}^n q_j \times A_j \rightarrow Q_{\text{gas-heat}} = Q_{\text{heater}} - Q_{\text{wall}} \rightarrow \gamma = \frac{Q_{\text{gas-heat}}}{l(T_{f1} - T_{f2})}$$



基于RHLM的密封条热泄漏系数测量装置

$5.00 \sim 15.00 \text{ W m}^{-2}$



待去噪时间序列小热流信号波动趋势

噪声来源分析: $q_k = q_{dk} + e_k$

- 热流密度传感器标定误差 $\pm 3\%$;
- 数据采集仪最大噪声 $\pm 1.2 \mu\text{V}$, $\pm 1.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;
- 温度稳定 \neq 绝对热平衡, 存在流动不稳定性。



二、热湿传递性能评价测量技术—绝热性能测量技术

技术1：引入数字滤波算法，并采用多维量化指标评价去噪结果的重复性、保真性

中值滤波器 $q_{k-1} = \text{median}_L \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ $q_k = \text{median}_n \{q_{k-1}, \dots, q_{k-1}, q_k, q_{k+1}, \dots, q_{k+1}\}, (k=1, 2, \dots)$

移动平均滤波器 $q_k = \frac{q_{k-n} + \dots + q_{k-1} + q_k + q_{k+1} + \dots + q_{k+n}}{n}$

限幅滤波器 $q_k = \begin{cases} q_k & |q_k - q_{k-1}| \leq L \\ q_{k-1} & |q_k - q_{k-1}| > L \end{cases}$

高斯滤波器 $G(q_k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{(q_k - \bar{q}_k)^2}{2\sigma^2})$
 $q_k = \frac{q_{k-n}G(q_{k-n}) + \dots + q_{k-1}G(q_{k-1}) + q_kG(q_k) + q_{k+1}G(q_{k+1}) + \dots + q_{k+n}G(q_{k+n})}{G(q_{k-n}) + \dots + G(q_{k-1}) + G(q_k) + G(q_{k+1}) + \dots + G(q_{k+n})}$

S-G滤波器
 $q_{k,p} = a_0 + a_1k + a_2k^2 + \dots + a_pk^p = \sum_{i=0}^p a_i k^i$

$q_{k,p}$	1	k	\dots	$(k-v)^p$	a_0	\vdots	ε_0
$q_{k,p}$	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$q_{k,p}$	$k-1$	\dots	\dots	$(k-1)^p$	a_{p-1}	\vdots	ε_{p-1}
$q_{k,p}$	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$q_{k,p}$	1	k	\dots	k^p	a_k	\vdots	ε_k
$q_{k,p}$	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$q_{k,p}$	1	$k+1$	\dots	$(k+1)^p$	a_{k+1}	\vdots	ε_{k+1}
$q_{k,p}$	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$q_{k,p}$	1	$k+v$	\dots	$(k+v)^p$	a_p	\vdots	ε_p

卡尔曼滤波器
 $\hat{q}_{k+1} = F_k \hat{q}_{k|k} + B_k \bar{u}_k$ $\hat{C}_{k+1} = F_k \hat{C}_{k|k} + F_k^{-T} + Q_k$ $\hat{C}_{k+1} = (I - K_k H_k) \hat{C}_{k|k}$
 $K_k = \hat{C}_{k|k} H_k^T (H_k \hat{C}_{k|k} H_k^T + R_k)^{-1}$ $\hat{q}_{k+1} = \hat{q}_{k+1} + K_k (z_k - H_k \hat{q}_{k+1})$

数字滤波热流去噪模型

信噪比 $SNR = 10 \times \lg \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q}_n)^2} \right)$

标准差 $SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q}_n)^2}$ $\bar{q}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$

平均绝对差 $MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}_n|}{n}$

相关系数
 $CC = \frac{Cov(q_1, q_n)}{\sqrt{Var(q_1)Var(q_n)}}$
 $Var(q_1) = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n}$
 $Var(q_n) = \frac{\sum_{i=1}^n (q_n - \bar{q}_i)^2}{n}$
 $Cov(q_1, q_n) = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})(q_n - \bar{q}_i)}{n-1}$

滤波器及工作参数：SNR小、SD小、MAD小、CC大

变异系数 $c_{r-SNR} = \frac{\sigma_{SNR}}{SNR} \times 100\%$ $c_{r-SD} = \frac{\sigma_{SD}}{SD} \times 100\%$ $c_{r-MAD} = \frac{\sigma_{MAD}}{MAD} \times 100\%$ $c_{r-CC} = \frac{\sigma_{CC}}{CC} \times 100\%$

$\{q_{1T}, q_{2T}, q_{3T}, \dots, q_{(k-1)T}, q_{kT}, q_{(k+1)T}, \dots, q_{nT}\}$
 $\left\{ \frac{q_{1T} + q_{2T}}{2}, \frac{q_{1T} + q_{2T} + q_{3T}}{3}, \dots, \frac{q_{1T} + q_{2T} + q_{3T} + \dots + q_{kT}}{k}, \dots, \frac{q_{1T} + q_{2T} + q_{3T} + \dots + q_{nT}}{n} \right\}$

样本无关性尺寸k与采样周期T: $c_r < 2\%$

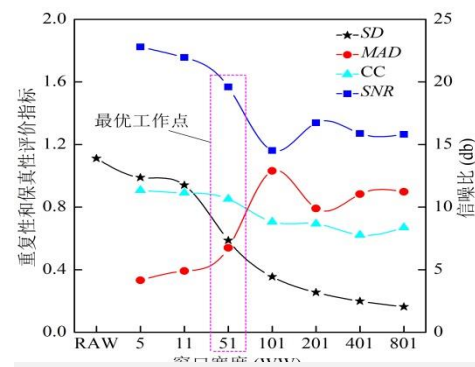
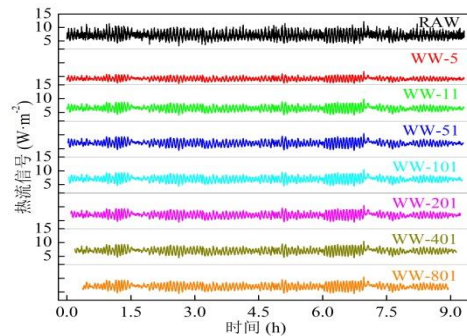
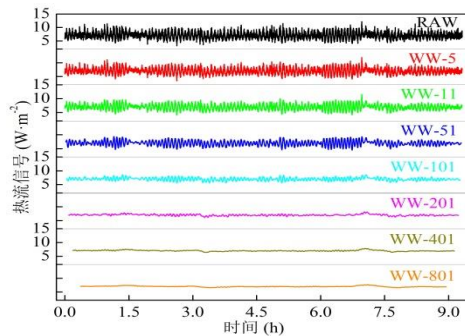
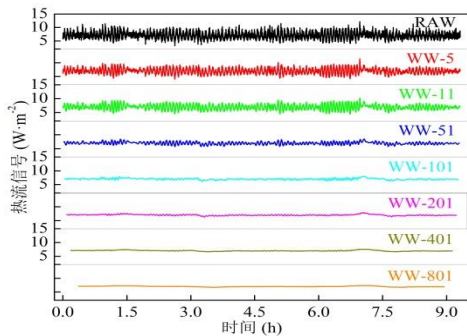
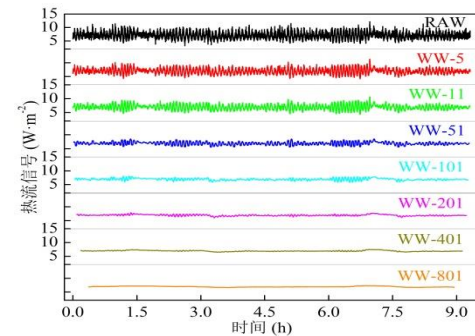
重复性和保真性量化评价指标

工作实质：

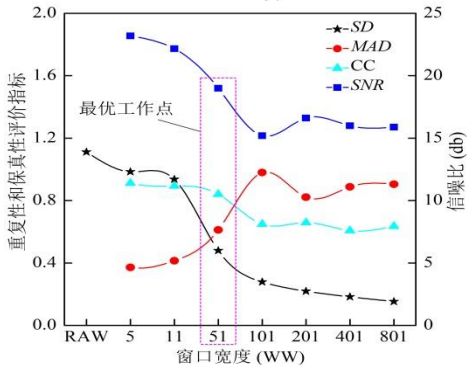
为测量装置提供原始数据处理方法：**合适的滤波算法、工作参数、样本容量、采样周期**，以提升测量精度。

二、热湿传递性能评价测量技术—绝热性能测量技术

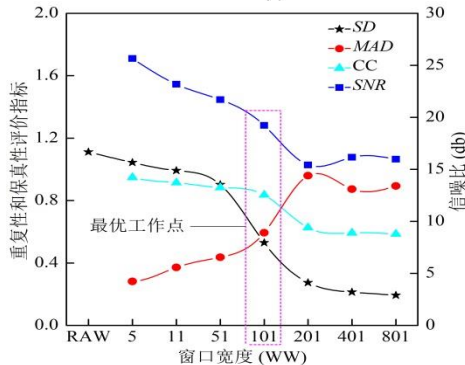
技术1：引入数字滤波算法，并采用多维量化指标评价去噪结果的重复性、保真性



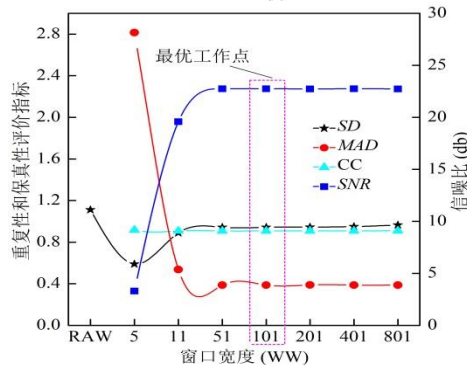
中值滤波器



移动平均滤波器



S-G滤波器



高斯滤波器

工作参数对去噪效果的影响规律：**相交区域规则**



二、热湿传递性能评价测量技术—绝热性能测量技术

技术2：热流测点优化分布—“特征热流法”，多维不确定度分析

$$\gamma = \frac{Q_{\text{heater}} - \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{1}{51} \sum_{i=1}^{51} \frac{E_{\text{HFS},i,j}}{S_{\text{HFS},i,j} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},i,j} + 0.917)} \right) \times A_j \right]}{T_{\text{in}} - T_{\text{out}}}$$

$$u_{\gamma}^2(Q_{\text{heater}}) = \left(\frac{\partial f}{\partial Q_{\text{heater}}} \right)^2 u^2(Q_{\text{heater}}) = \frac{u^2(Q_{\text{heater}})}{(T_{\text{in}} - T_{\text{out}})^2}$$

$$u_{\gamma}^2(E_{\text{HFS},1,1}) = \left(\frac{\partial f}{\partial E_{\text{HFS},1,1}} \right)^2 u^2(E_{\text{HFS},1,1}) = \left(\frac{1}{51} \frac{A_1}{S_{\text{HFS},1,1} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},1,1} + 0.917)} \right)^2 u^2(E_{\text{HFS},1,1})$$

$$u_{\gamma}^2(E_{\text{HFS},2,1}) = \left(\frac{\partial f}{\partial E_{\text{HFS},2,1}} \right)^2 u^2(E_{\text{HFS},2,1}) = \left(\frac{1}{51} \frac{A_1}{S_{\text{HFS},2,1} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},1,1} + 0.917)} \right)^2 u^2(E_{\text{HFS},2,1})$$

...

$$u_{\gamma}^2(E_{\text{HFS},51,n}) = \left(\frac{\partial f}{\partial E_{\text{HFS},51,n}} \right)^2 u^2(E_{\text{HFS},51,n}) = \left(\frac{1}{51} \frac{A_n}{S_{\text{HFS},51,n} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},51,n} + 0.917)} \right)^2 u^2(E_{\text{HFS},51,n})$$

$$u_{\gamma}^2(T_{\text{HFS},1,1}) = \left(\frac{\partial f}{\partial T_{\text{HFS},1,1}} \right)^2 u^2(T_{\text{HFS},1,1}) = \left(\frac{E_{\text{HFS},1,1} \times A_1 \times S_{\text{HFS},1,1} \times 0.00334}{51 (S_{\text{HFS},1,1} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},1,1} + 0.917) (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}))} \right)^2 u^2(T_{\text{HFS},1,1})$$

$$u_{\gamma}^2(T_{\text{HFS},2,1}) = \left(\frac{\partial f}{\partial T_{\text{HFS},2,1}} \right)^2 u^2(T_{\text{HFS},2,1}) = \left(\frac{E_{\text{HFS},2,1} \times A_1 \times S_{\text{HFS},2,1} \times 0.00334}{51 (S_{\text{HFS},2,1} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},2,1} + 0.917) (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}))} \right)^2 u^2(T_{\text{HFS},2,1})$$

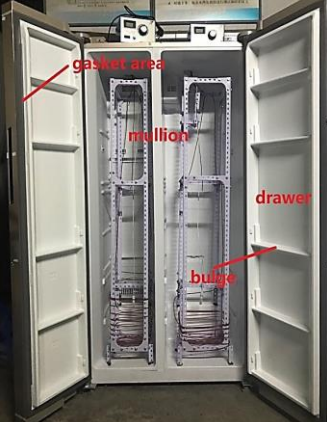
...

$$u_{\gamma}^2(T_{\text{HFS},55,5}) = \left(\frac{\partial f}{\partial T_{\text{HFS},55,5}} \right)^2 u^2(T_{\text{HFS},55,5}) = \left(\frac{E_{\text{HFS},55,5} \times A_5 \times S_{\text{HFS},55,5} \times 0.00334}{51 (S_{\text{HFS},55,5} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},55,5} + 0.917) (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}))} \right)^2 u^2(T_{\text{HFS},55,5})$$

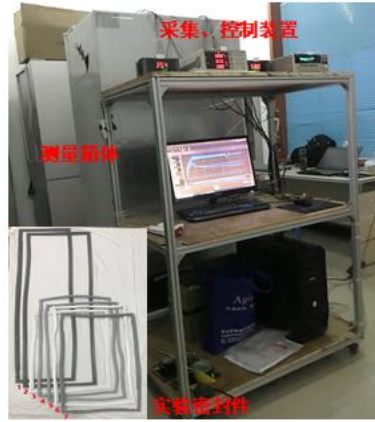
$$u_{\gamma}^2(T_{\text{in}}) = \left(\frac{\partial f}{\partial T_{\text{in}}} \right)^2 u^2(T_{\text{in}}) = \left[\frac{-Q_{\text{ban}} + \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{1}{51} \sum_{i=1}^{51} \frac{E_{\text{HFS},i,j}}{S_{\text{HFS},i,j} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},i,j} + 0.917)} \right) \times A_j \right]}{(T_{\text{in}} - T_{\text{out}})^2} \right]^2 u^2(T_{\text{in}})$$

$$u_{\gamma}^2(T_{\text{out}}) = \left(\frac{\partial f}{\partial T_{\text{out}}} \right)^2 u^2(T_{\text{out}}) = \left[\frac{Q_{\text{ban}} - \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{1}{51} \sum_{i=1}^{51} \frac{E_{\text{HFS},i,j}}{S_{\text{HFS},i,j} \times (0.00334 \times T_{\text{HFS},i,j} + 0.917)} \right) \times A_j \right]}{(T_{\text{in}} - T_{\text{out}})^2} \right]^2 u^2(T_{\text{out}})$$

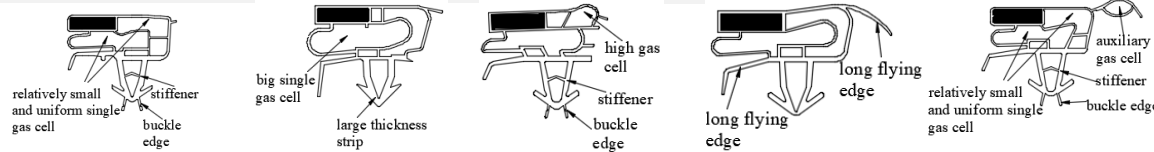
$$u_{\gamma} = \sqrt{u_{\gamma}^2(Q_{\text{heater}}) + u_{\gamma}^2(E_{\text{HFS},1,1}) + \dots + u_{\gamma}^2(E_{\text{HFS},51,n}) + u_{\gamma}^2(T_{\text{HFS},1,1}) + \dots + u_{\gamma}^2(T_{\text{HFS},51,n}) + u_{\gamma}^2(T_{\text{in}}) + u_{\gamma}^2(T_{\text{out}})}$$



箱体测量区域划分



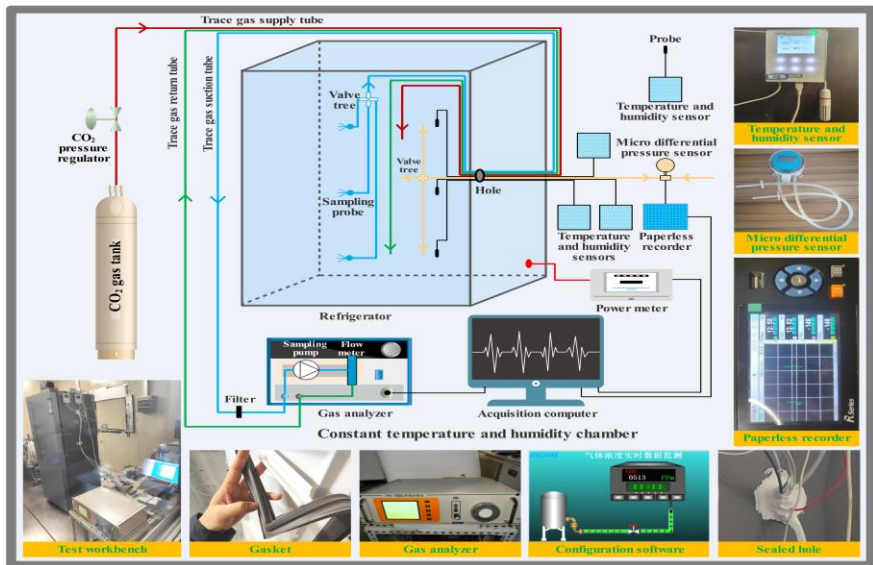
测量装置搭建实物图



测量结果：

- ◆ 热泄漏系数的测量误差可控制在±5%以内
- ◆ 典型密封件热泄漏系数约为 $4.50 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

二、热湿传递性能评价测量技术—密封性能测量技术



气体种类	相对分子量	扩散系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
H_2	2	4.10×10^{-5}
NH_3	17	2.80×10^{-5}
H_2O	18	2.56×10^{-5}
空气	29	2.20×10^{-5}
O_2	32	2.06×10^{-5}
CO_2	44	1.64×10^{-5}
N_2O	44	1.41×10^{-5}
SO_2	64	1.15×10^{-5}
Cl_2	71	1.27×10^{-5}
SF_6	146	0.92×10^{-5}

考虑到安全性、分子扩散运动

示踪气体选择

$$D_{\text{trace gas - air}} = \frac{0.0101 \cdot T^{1.75} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{trace gas}}} + \frac{1}{M_{\text{air}}}}}{p \left[(\sum v_{\text{trace gas}})^{1/3} + (\sum v_{\text{air}})^{1/3} \right]^2}$$

气体充注方法

浓度衰减法

正压：抽气管断开，回气管连接
 负压：抽气管连接，回气管断开密闭：
 抽气管连接，回气管连接

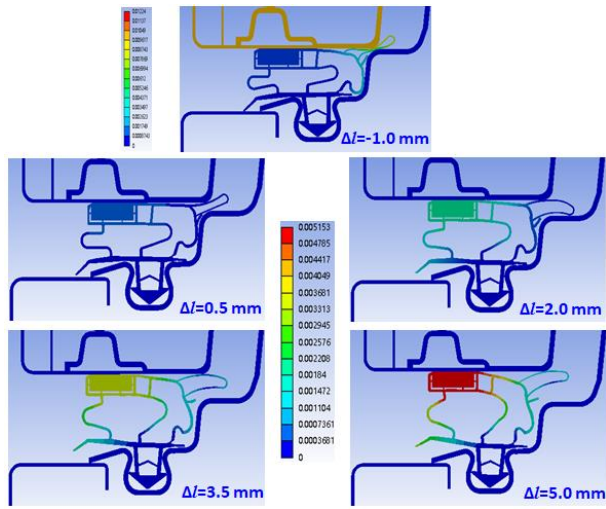


三、动态工况下的热湿传递特性—热传递特性仿真分析

静态结构&传热耦合仿真

① 静态结构分析:

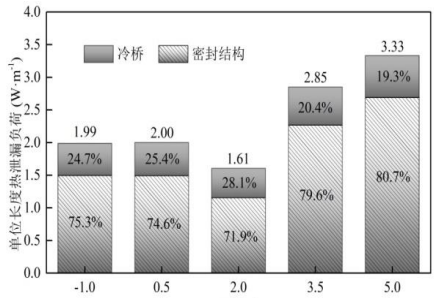
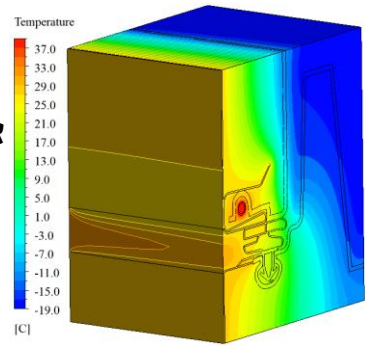
- ◆ 获取密封部位的刚-柔装配状态
- ◆ 厘清密封件的精细化传热路径



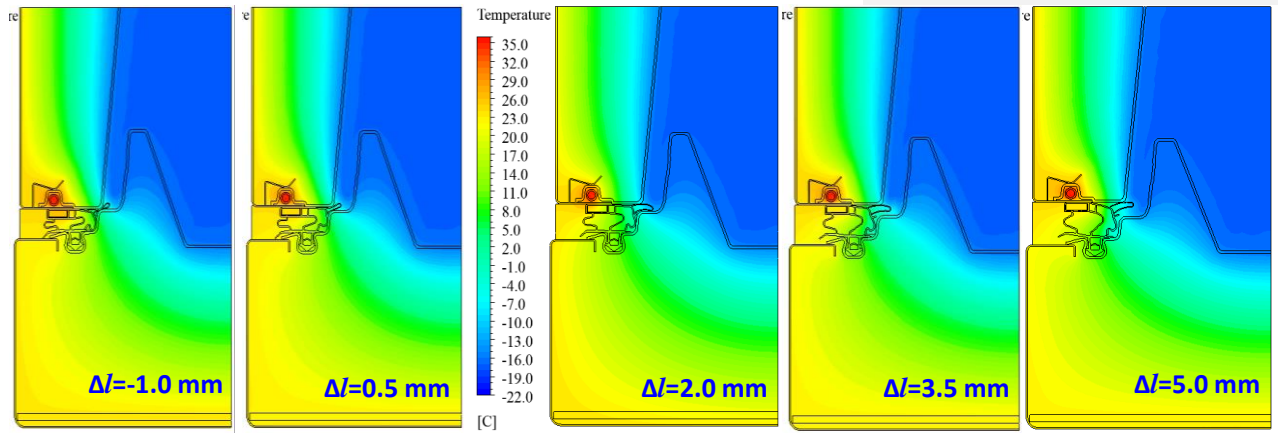
不同形变量工况密封件位移云图

② 三维传热仿真分析:

- ◆ 基于实际变形模型的传热特性仿真精度提高15%
- ◆ 胶条-冷空气和胶条-箱体外壳的热泄漏最大



不同形变量工况下的热泄漏负荷

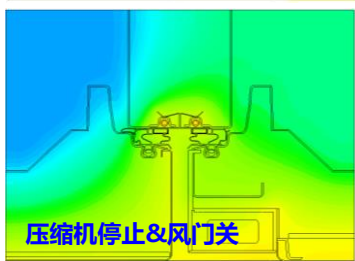
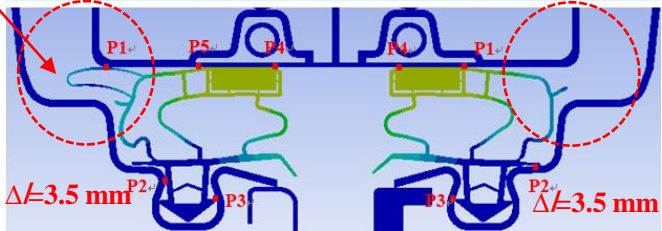
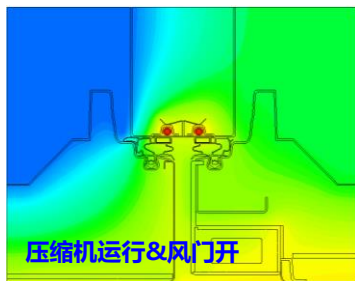
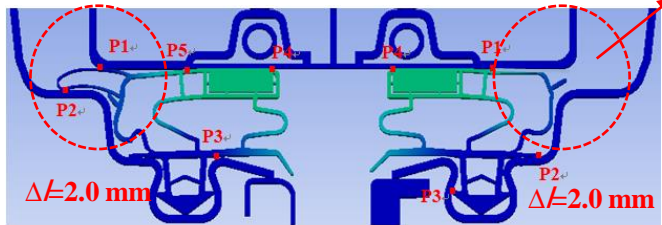


不同形变量工况下密封件截面温度云图

三、动态工况下的热湿传递特性—热传递特性仿真分析

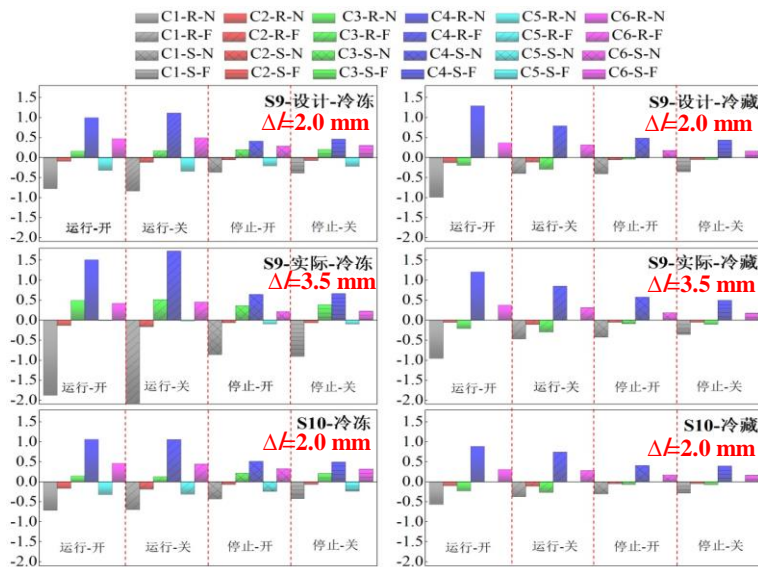
动态运行工况下传热特性

密封失效



冷冻密封条

冷藏密封条

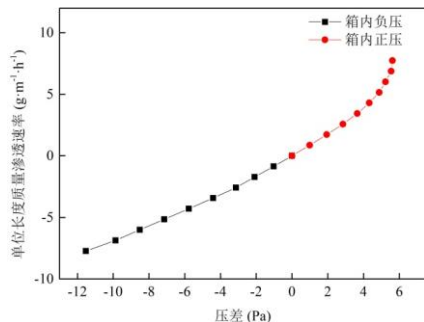


仿真计算结果

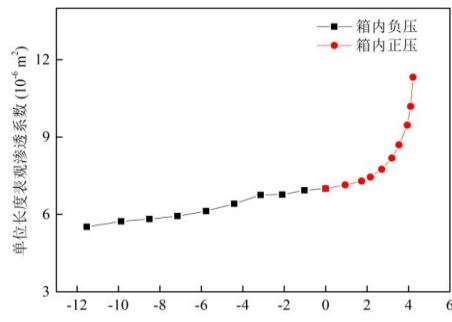
- 有辅助气囊的密封条抵抗形变量能力更强，在 $\Delta l = 3.5 \text{ mm}$ 时方发生密封失效；
- 压缩机运行时，防凝露管温度高，冷空气来流温度低、速度高，各路径的传热负荷大于压缩机停止工况；
- 结构改进提高绝热性能时，应将各个运行工况考虑在内。

三、动态工况下的热湿传递特性—湿传递特性实验分析

气压差-温度对湿空气渗透的耦合作用机制



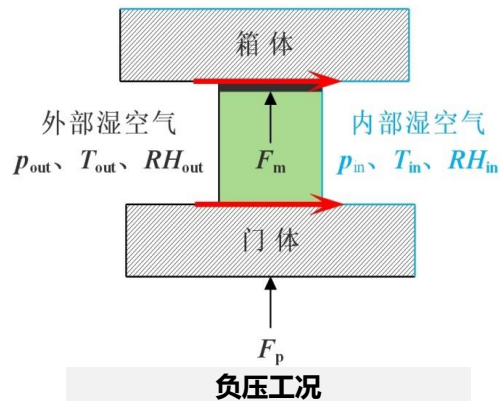
湿空气渗透速率随气压差变化趋势



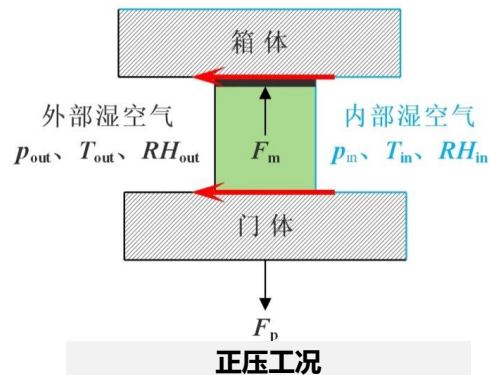
k_{app} 随气压差变化趋势

测量结果分析:

- 负压工况下，内向压差增大，接合面接触应力增大，渗透间隙尺寸减小，克努森数增大，更易发生渗透率低的**分子流**，湿空气表观渗透系数（**湿空气吸入系数**）从 $6.93 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 下降至 $5.52 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ；
- 正压工况下，外向压差增大，接合面接触应力减小，渗透间隙尺寸增大，克努森数减小，更易发生渗透率高的**滑脱流**，当外向压差足够大，某些软硬接触面甚至脱离时，克努森数极小，会发生连续流，湿空气表观渗透系数（**湿空气呼出系数**）从 $7.08 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 上升至 $1.13 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ；
- 湿空气温度上升，其分子平均自由程下降，渗透阻力下降，渗透增强。



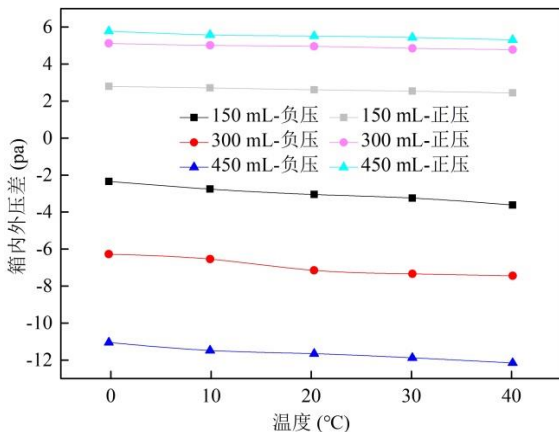
负压工况



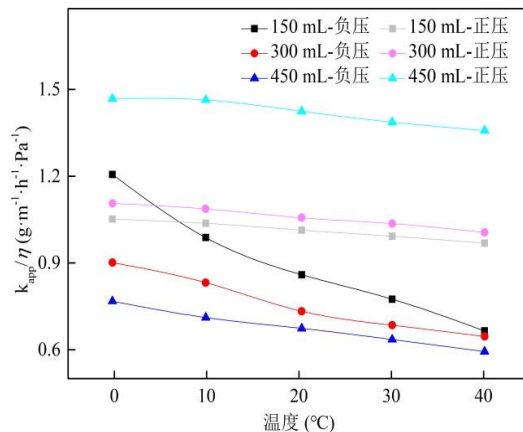
正压工况

三、动态工况下的热湿传递特性—湿传递特性实验分析

气压差-温度对湿空气渗透的耦合作用机制



湿空气渗透速率随温度变化趋势



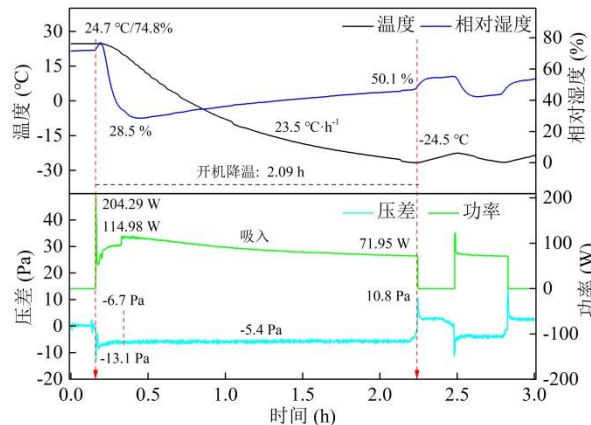
k_{app}/η 随温度变化趋势

测量结果分析:

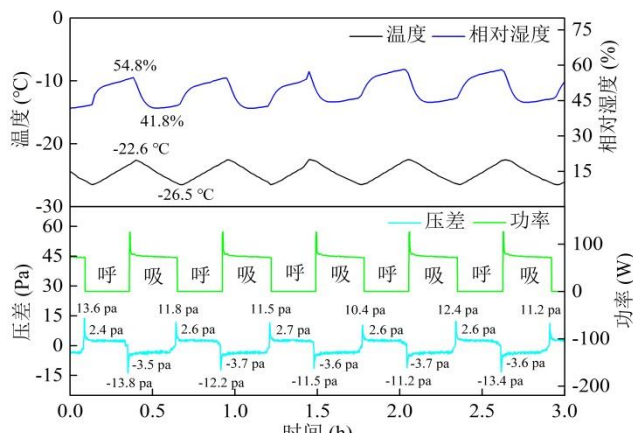
- 相同体积渗透流量下，正压工况气压差值随温度的升高略降低，负压工况气压差值随温度的升高而升高，温度从0升高到40.0 °C时，压差值变化6.49%~54.2%，温度对通过影响湿空气的流动参数来影响渗透特性；
- 湿空气温度上升，其分子平均自由程下降，即在分子热运动中发生连续两次碰撞的路程下降，发生碰撞的概率更大，渗透阻力下降，渗透作用增强，产生相同渗透量下的渗透势即气压差更小。

三、动态工况下的热湿传递特性—湿传递特性实验分析

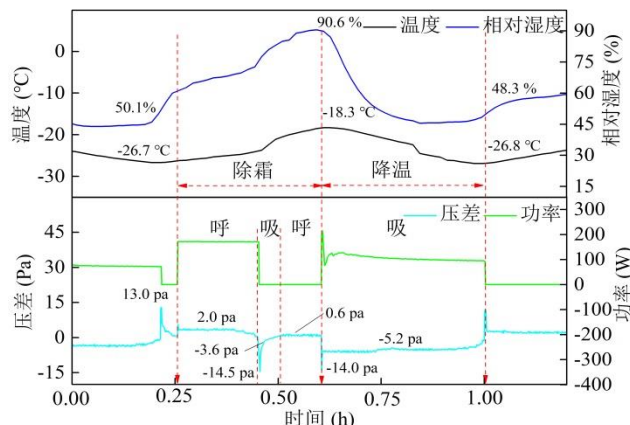
关门状态下“呼吸效应”特性



开机降温工况运行参数变化



间歇制冷工况运行参数变化



除霜-降温工况运行参数变化

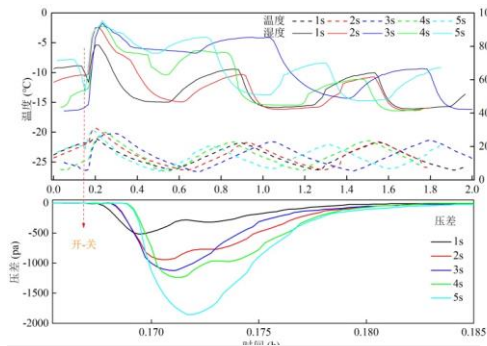
测量结果分析:

- 开机降温工况，产生持续负压，湿空气发生“吸入效应”；
- 间歇制冷工况，压缩机启动与停止造成制冷量的间隙输出，压缩机运行阶段发生“吸入效应”，压缩机停机阶段发生“呼出效应”；
- 除霜-降温工况，压缩机停机-电加热通电-电加热断电-压缩机开机，形成了“呼出-吸入-呼出-吸入”效应。

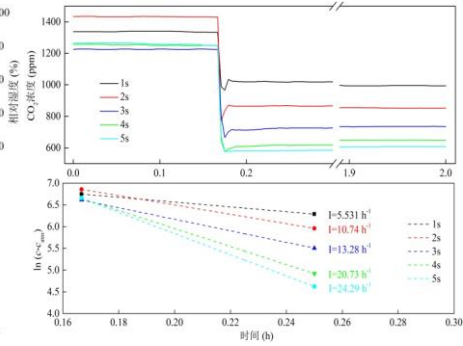


三、动态工况下的热湿传递特性—湿传递特性实验分析

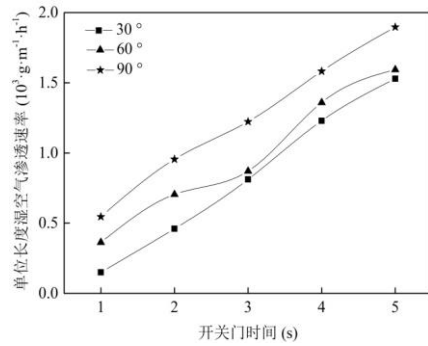
开门-关门状态下“呼吸效应”特性



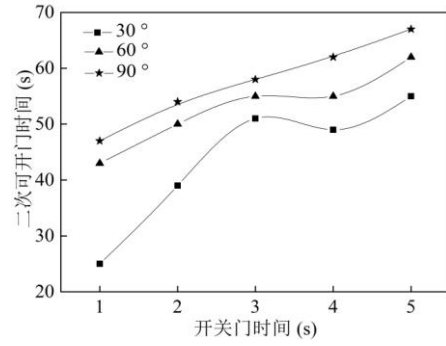
不同开关门时间下的内部空气参数变化



不同开关门时间下的CO₂浓度变化



开门角与时间对渗透速率的影响



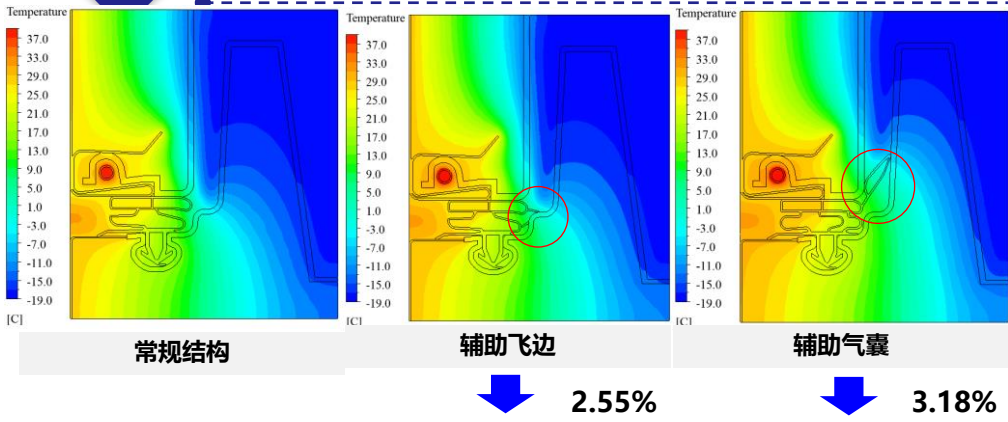
开门角与时间对二次可开门时间影响

“呼吸效应”特性分析:

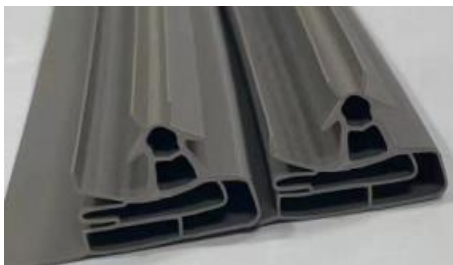
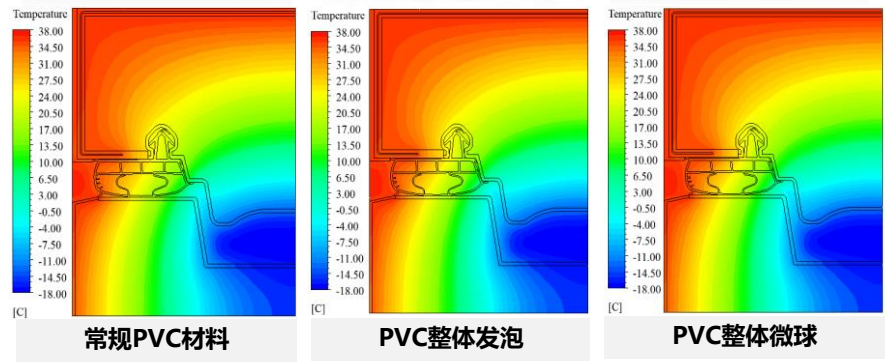
- 开门-关门过程发生强烈的“呼吸效应”，渗透速率约关门状态的30~300倍，开关门时间越长，湿空气“呼吸”量越大，对内部温湿度的干扰也越大，温湿度恢复正常波动状态的时间也越长；
- 湿空气“呼吸”量越大，关门后温湿度下降幅度越大，形成的负压值（-500~1800pa）和开门力越大，吸合面和安装面接触应力越大，吸入系数越小，负压被平衡时间（25~67 s）越长。



四、柔性密封条性能提升的案例—结构材料改进降低能耗



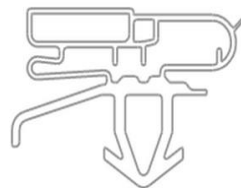
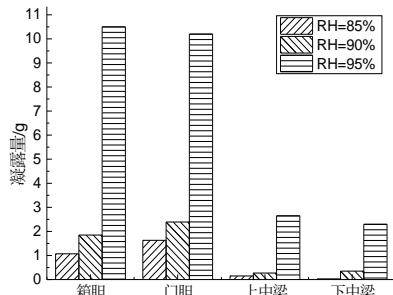
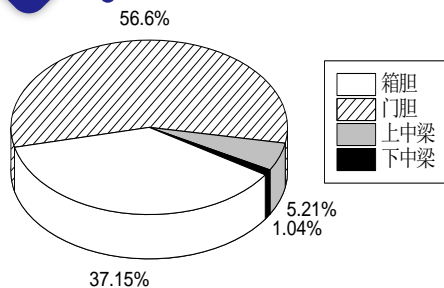
改进胶条PVC材料加工工艺, 导热系数下降30%



主体高度由8.5 mm降低至6.5 mm

密封条	样机	耗电量 kWh/24h
8.5 mm	样机1	0.88
	样机2	0.86
6.5 mm	样机1	0.86
	样机2	0.83
节能提升效果	样机1	2.27% ↓
	样机2	3.48% ↓

四、柔性密封条性能提升的案例——结构改进抑制凝露结霜



原结构冷冻室内胆结霜



改进结构冷冻室内胆结霜

原结构

不冲孔

拐角冲孔

单飞边

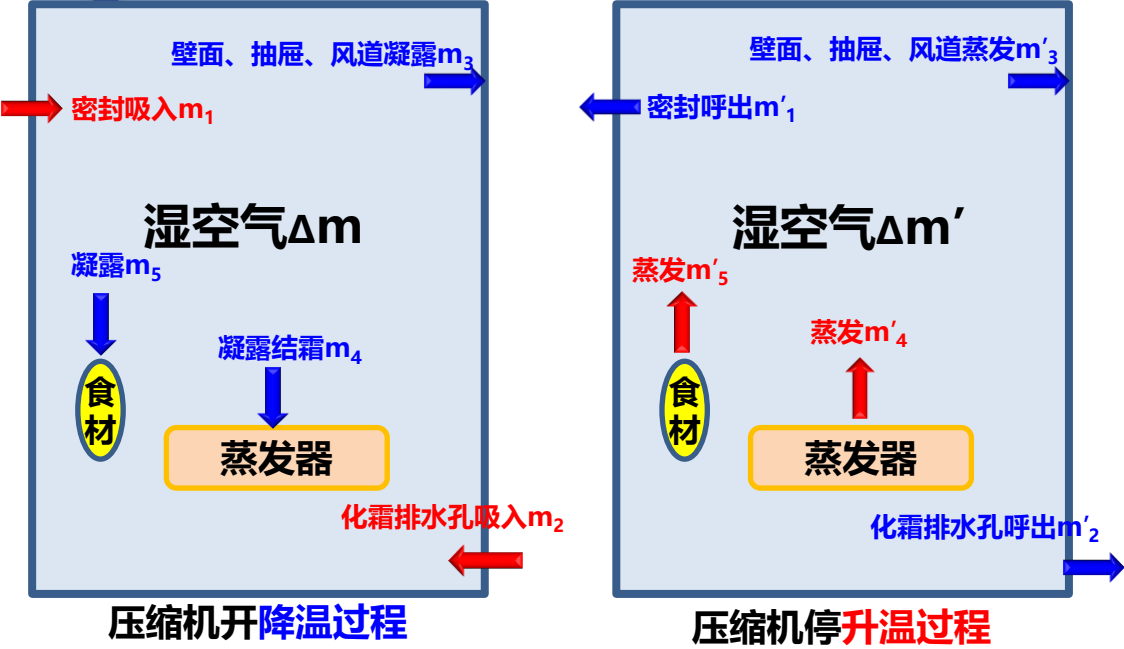
三飞边

冷藏室箱胆顶部凝露对比

- 门胆、箱胆凝露量占90%以上，单飞边与三飞边结构凝露量可分别下降9.87%、13.25%，降低客户投诉率。

- 高气囊增大非磁条面与箱体的接触应力，辅助飞边增大渗透长度，从而有效抑制外部高热高湿空气进入箱体内部，抑制内胆结霜。

五、柔性密封技术未来发展方向——密封微传递与空间热湿耦合



湿空气传质模型

水蒸气相变过程的质量、能量源项:

$$S_m = \dot{m}_{con} \frac{A_{wall}}{V_{cell}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i) = S_{m_i}$$

$$S_h = S_m \cdot L$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \alpha_i Y_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i u_i Y_i) = -\nabla \cdot \alpha_i J_i + S_{h_i}$$

$$\dot{m}_{con} = -\rho D_{lim} \frac{x_{cell} - x_{satf}}{D_{i_{cell-face}}}$$

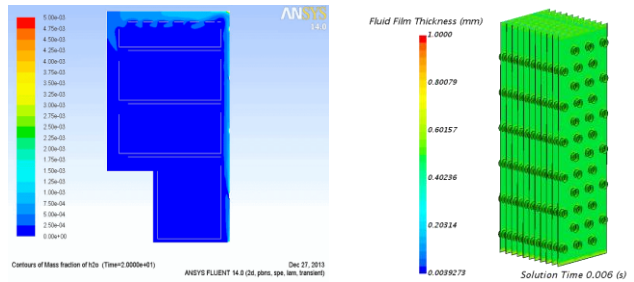
$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i u_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i u_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \sigma + S_{h_i}$$

$$\bar{\tau}_i = \alpha_i \mu_i (\nabla u_i + \nabla u_i^T) + \alpha_i (\lambda_i - \frac{2}{3} \mu_i) \nabla \cdot u_i \bar{I}$$

$$\dot{m}_{eva} = \rho D_{lim} \frac{x_{cell} - x_{satf}}{D_{i_{cell-face}}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i h_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i h_i) = \nabla \cdot (k_i \nabla T_i) + S_{h_i}$$

UDF

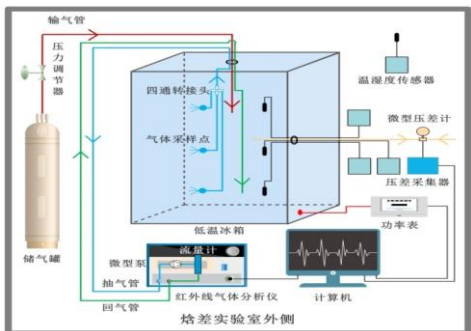
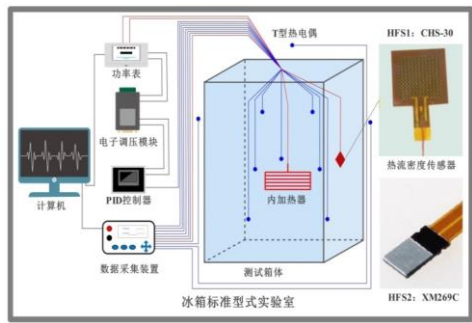
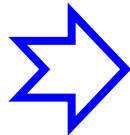


湿空气绝对含湿量变化 $\Delta m = (\text{密封 } m_1 + \text{化霜排水孔 } m_2 + \text{壁面、抽屉、风道 } m_3 + \text{蒸发器 } m_4 + \text{食材 } m_5)$ 水分迁移速率

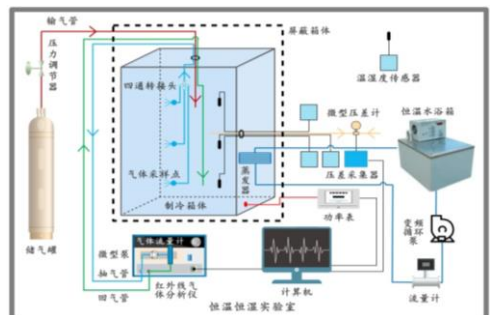
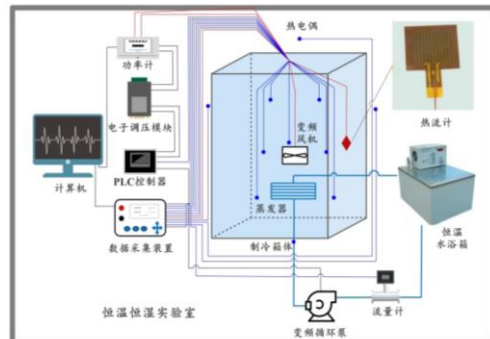
建立密封条热流固耦合模型，并与空间热湿模型进行动态耦合，构建制冷空间热湿耦合传递一体化模型，探究环境-密封条-制冷空间热湿响应特性。

五、柔性密封技术未来发展方向—密封条性能测量行业标准

“精益求精”的性能测量技术，为制定行业标准提供参考思路



反向→正向
与实际传热方向一致



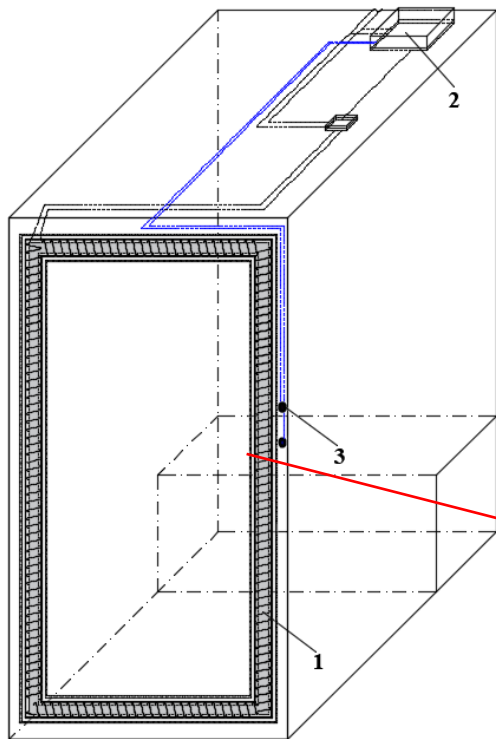
呼吸平均→呼吸切换
分别测量“呼出”、“吸入”渗透

五、柔性密封技术未来发展方向—卡槽接口结构统一规范化

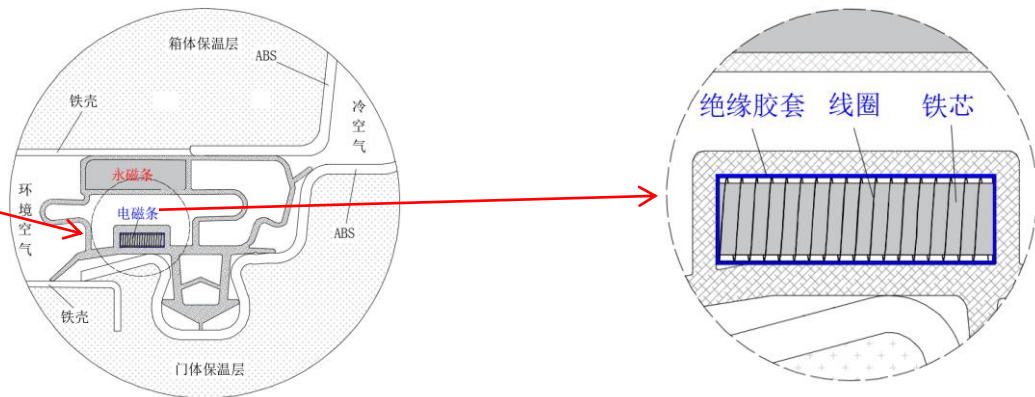


门体与箱体的卡槽结构多样、造成门封结构不规范，规范化的卡槽形式有利于集中行业力量解决密封痛点、促进密封技术发展

五、柔性密封技术未来发展方向—密封强度自适应可调



- ◆ **1-磁力可调门封**：在门封内部串入可改变磁力的电磁条，通过削弱永磁条磁力，实现密封力与门封强度的调节；
- ◆ **2-磁力调控系统**：控制模块连接微型电子调压模块，微型电子调压模块的直流电流输出端口与线圈相连，通过调节直流电流大小来控制电磁条的磁吸力；
- ◆ **3-人体感应模块**：为便于用户操作，在门把手或常开门位置设置触控感应开关，手指触摸后，启动“密封解锁”、“一键开门”，实现易开门功能。



设计为电磁感应吸合，密封强度从不可调，转变为主动、按需调节



团队在柔性密封条方面的研究成果

发表SCI、EI、核心及会议论文约15篇，授权发明专利4项

一、论文

1. Liu G Q, Yan G*, Yu J L. A review of refrigerator gasket: development trend, heat and mass transfer characteristics, structure and material optimization[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110975.
2. Liu G Q, Xiong T, Yan G*, et al. Analysis of digital filters used in time-series small heat flux measurement[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 200: 117630.
3. Liu G Q, Yan G*, Yu J L, et al. Research on test method of heat transfer coefficient for refrigerator gasket[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 110: 106-120.
4. Yan G*, Chen Q, Sun Z L. Numerical and experimental study on heat transfer characteristic and thermal load of the freezer gasket in frost-free refrigerators[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 63: 25-36.
5. Liu G Q*, Xiong T, Ying Y Z, et al. Research on Proper Sampling Parameters Determination Approach of Digital Filters in Small Steady-state Heat Flux Measurement[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023.
6. Chen Q, Yan G*, Sun Z L. Simulation and experimental study on gaskets heat transfer characteristics in the mullion region of frost-free refrigerators[C]. ACRA 2016-8th Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning, Taipei, TAIWAN, 2016.
7. Liu G Q*, Dong P W, Xiong T, et al. Numerical Study on the Effect of Soft and Hard Contact Deformation on the Heat Transfer Characteristic of Refrigerator Gasket[J]. Case Studies in Thermal Engineering.
8. Liu G Q*, Li Y L, Xiong T, et al. Study of Breathing Behavior and Its Heat Load for a Refrigerator through the Gasket]. International Journal of Heat and Mass Transfer.
9. 陈旗, 晏刚*, 方忠诚, 等. 直冷冰箱冷藏室门封传热特性研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(6):66-73.
10. 刘朋, 刘国强*, 张大卫, 等. 冷柜门封传热特性分析及绝热性能提升研究[C]. 2022年中国家用电器技术大会, 宁波. (会议优秀论文)

二、专利

1. 刘国强, 晏刚. 一种冰箱不同部位漏热负荷测试装置与方法[P]. 中国, ZL201910331955.82019.
2. 刘国强, 晏刚, 应雨铮. 一种可调节密封强度的冰箱及其工作方法[P]. 中国, ZL202010956711.1.
3. 刘国强, 晏刚, 应雨铮. 一种小型制冷空间门封部位湿空气交换率检测装置与方法[P]. 中国, ZL202010880067.4.
4. 刘国强, 应雨铮, 晏刚. 一种具有强密封效果的冰箱门密封胶条[P]. 中国, ZL202010956689.0.

谢谢大家

西安交通大学 制冷与低温工程系

刘国强

手机/微信：15626481528

电子邮箱：guoqiangliu@xjtu.edu.cn