

# 自然工质制冷压缩机 在大型工业制冷板块的应用

冰轮环境技术股份有限公司 设计部 设计经理：侯丽艳

2021年4月8日



冰轮环境技术股份有限公司  
MOON ENVIRONMENT TECHNOLOGY CO.,LTD.

SINCE 1956

# CONTENTS

PART 1 自然工质的特点及优势

PART 2 自然工质制冷压缩机 (组)设计

PART 3 典型应用及案例

# PART 1

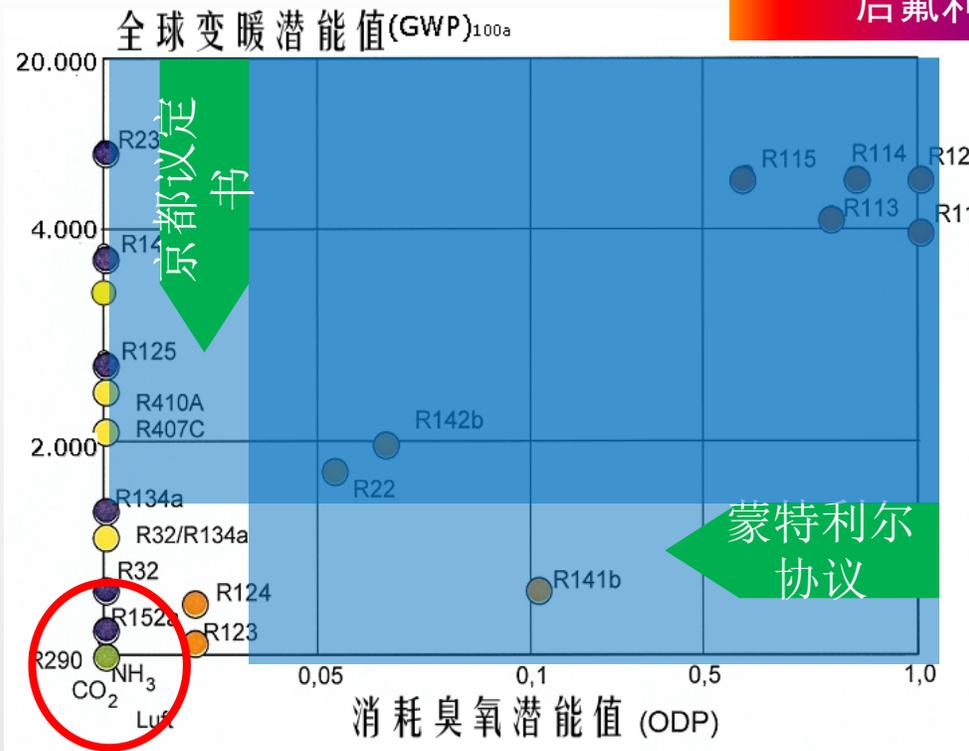
## 自然工质的特点及优势

高 效 · 环 保 · 安 全





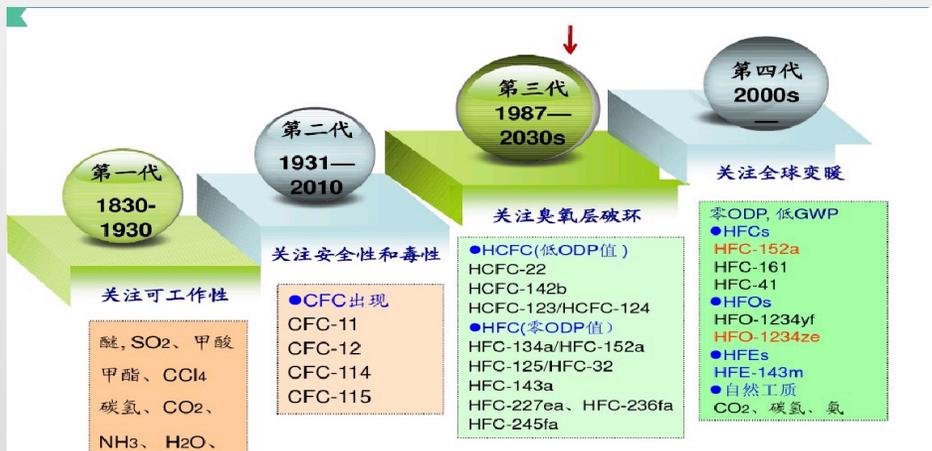
R22



## 后氟利昂时代

- 1987年：蒙特利尔议定书，限制（氯氟烃）CFCs的使用
- 1997年：京都决议案，限制对（含氢氯氟烃）HCFCs的使用

R134a  
R507  
R410  
R404



R290  
R1270  
R170  
R1150

## HCs工质与其他环保制冷剂的比较

	R1234yf	R1234ze	R152A	R290	R1270	R170	R1150	R32	R507	R452A	R449	NH3
沸点 (°C)	-28	-19	-25	<b>-42.2</b>	<b>-47.7</b>	<b>-88.9</b>	<b>-104</b>	-51.7	-46.7	-46.9	-45.7	-33.5
临界温度 (°C)	95	109	113	<b>96.7</b>	<b>92.4</b>	<b>32.3</b>	<b>9.2</b>	78.1	70.9	75.1	82.2	132.4
GWP	1	6	120	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	670	3900	2141	1397	0
ASHRAE 安全分类	A2L	A1	A2	<b>A3</b>	<b>A3</b>	<b>A3</b>	<b>A3</b>	A2无毒可燃	A1 (无毒不可燃)	A1	A1	B2 低可燃高毒性
使用情况	美国汽车空调行业	美国热泵行业	作为混合制冷剂组分	<b>国内空调业大力扶持石油炼化产品</b>	<b>石油化工副产物</b>	<b>低温复叠系统的低温段石油、化工副产品</b>		日本主流制冷剂	主流低温制冷剂	欧洲最新开发	欧洲最新开发	应用广泛
价格	昂贵, 难买	昂贵, 难买								昂贵, 难买	昂贵, 难买	
分析	不适用于低温制冷	不适用于低温制冷	不适用于低温制冷	<b>最大障碍可燃性, 需要防爆</b>				有可燃性, 需要考虑防爆,	由 R 1 2 5 和 R143混合而成	R 3 2 R 1 2 5 R 1 2 3 4 Y F 混合,	R 3 2 R 1 2 5 R 1 3 4 A R 1 2 3 4 Y F	需要控制充注量
淘汰情况	最新HFO, 符合要求	最新HFO, 符合要求	属于淘汰范围	<b>自然工质, 符合要求</b>				属于淘汰范围	属于淘汰范围	部分组分属于淘汰范围	部分组分属于淘汰范围	自然工质, 符合要求



# PART 2

## 自然工质制冷压缩机 (组)设计

总体要求 · 压缩机 · 压力容器 · 换热器  
器 · 配套阀门及电气控制

# 自然工质制冷压缩机设计——总体要求

## 执行标准

GB、HG、NBT

API、SH、SY

ASHRAE

ASME/TEMA、IEC

## 认证资质



U Stamp



ATEX  
Ex



## 设计体系支撑

基础体系

固定式压力容器规则设计 (A1A2A3)

空冷式热交换器产品：安全注册A2 A3

APIQ体系

安全

可靠

大型化

## 压缩机执行标准：API619 fifth edition (ISO10440-1) /GB/T25357/GB/T19410

### 5.2.8 Casings shall be made of steel if

- a) the rated discharge gauge pressure is over 2 750 kPa (27,5 bar; 400 psi),
- b) the discharge temperature is over 260 °C (500 °F);
- c) the gas is flammable or toxic.

NOTE In cases where cast-iron casings are acceptable, other considerations such as repair ability of the casing due to close rotor/casing clearances can be a consideration in specifying a steel casing.

5.5.1.2 Shafts shall be forged steel unless otherwise approved by the purchaser.

5.6.1.8 If either the process or seal-support fluid are toxic or flammable, a separation seal is required in addition to the primary seal to prevent leakage to the atmosphere or to the bearing housing. This separation seal shall be capable of acting as a temporary, emergency backup seal should the primary seal fail during operation. The second seal in a tandem seal or a separate single or double seal may be used as the separation seal. Flammable liquids shall be as defined in NFPA 30. See Figures 2 and 3 for typical arrangements of separation seals.

### 6.4.4.3 Vibration and position detectors

- 6.4.4.3.1 If specified, non-contacting vibration and axial-position transducers shall be supplied, installed, and calibrated in accordance with ANSI/API 670. See Figures B.3 and B.4.
- 6.4.4.3.2 If specified, seismic-vibration transducers shall be supplied, installed and calibrated in accordance with ANSI/API 670.
- 6.4.4.3.3 If specified, vibration, axial position and seismic monitors shall be supplied and calibrated in accordance with ANSI/API 670.

### 6.4.4.4 Bearing temperature monitor

- If specified, a bearing-temperature monitor shall be supplied and calibrated in accordance with ANSI/API 670. See Figures B.5 and B.6.

NOTE Due to size restrictions, there is the possibility of not being able to incorporate bearing-temperature monitoring on smaller models of compressors. On oil-flooded screw compressors, bearing-temperature monitoring might not be practical.

材料/加工工艺/  
加工设备的更改

密封要求的升级

可靠性的提高

## 压缩机执行标准：API619 fifth edition (ISO10440-1) /GB/T25357/GB/T19410

Table 6 — Bearing selection

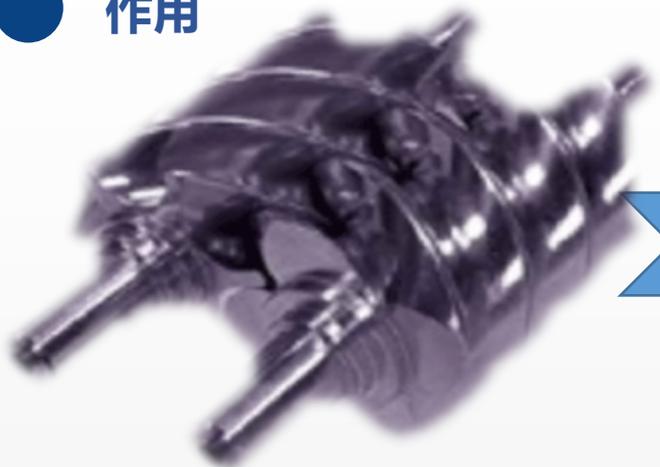
Condition	Bearing type and arrangement
Radial and thrust bearing speed and life within limits for rolling element bearings and Machine energy density below limit	Rolling element radial and thrust
Radial bearing speed or life outside limits for rolling element bearings and Thrust bearing speed and life within limits for rolling element bearings and Machine energy density below limit	Hydrodynamic radial and rolling element thrust or Hydrodynamic radial and thrust
Radial and thrust bearing speed or life outside limits for rolling element bearings or Machine energy density above limit	Hydrodynamic radial and thrust

Table 7 — Bearing limits

Limiting Factor	Conditions
Rolling element bearing speed	Factor <sup>a</sup> $N \cdot d_m$ shall not exceed the following values for pressurized oil-lubricated bearings <sup>b</sup> : Bearing type <span style="float: right;"><math>N \cdot d_m</math></span> Radial: single-row ball bearings <span style="float: right;">500 000</span> cylindrical-roller bearings Radial: tapered roller bearings <span style="float: right;">350 000</span> spherical roller bearings Thrust: single-row ball bearings <span style="float: right;">350 000</span> Thrust: double-row angular-contact <span style="float: right;">300 000</span> tapered roller bearings <span style="float: right;">250 000</span>
Rolling element bearing life	Basic rating, $L_{10}$ , in accordance with ISO 281 <sup>c</sup> of at least 50 000 h with continuous operation at rated conditions, and at least 32 000 h at maximum radial and axial loads and rated speed. NOTE The calculated bearing life is based on lubrication with clean, filtered oil. In oil-flooded screw compressors, aggressive and/or contaminated process gases can significantly shorten the actual bearing life.
Energy density	When the product of machine-rated power, expressed in kW (hp), and rated speed, expressed in rev/min, is $4.0 \times 10^6$ kW/min ( $5.4 \times 10^6$ hp/min) or greater, hydrodynamic radial and thrust bearings are required.
<sup>a</sup> $N$ is the rotative speed, expressed in revolutions per minute; $d_m$ is the mean bearing diameter, $(d + D)/2$ , expressed in millimetres; $D$ is the bearing outer diameter, expressed in millimetres; $d$ is the bearing inner diameter, expressed in millimetres. <sup>b</sup> For flooded screw compressors with special directed (jet) lubrication arrangement, the acceptable $N \cdot d_m$ factor for radial and thrust ball bearings may be increased according to the bearing manufacturer's recommendation. <sup>c</sup> For the purpose of this provision, ABMA Standard 9 is equivalent to ISO 281.	

额定功率超过1350kW  
(转速2960r/min)  
API标准推荐配置流体  
动压轴承

## 作用

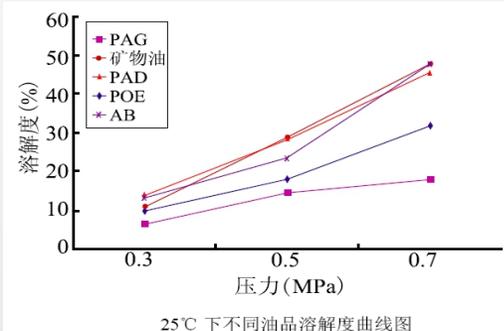


心脏 血液 营养液



## 选型原则

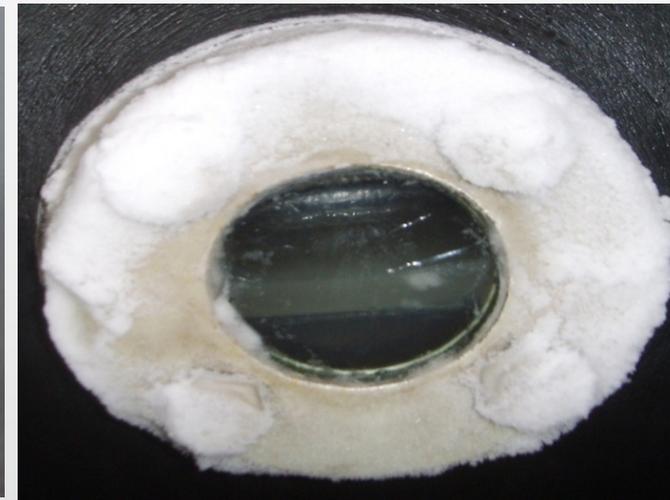
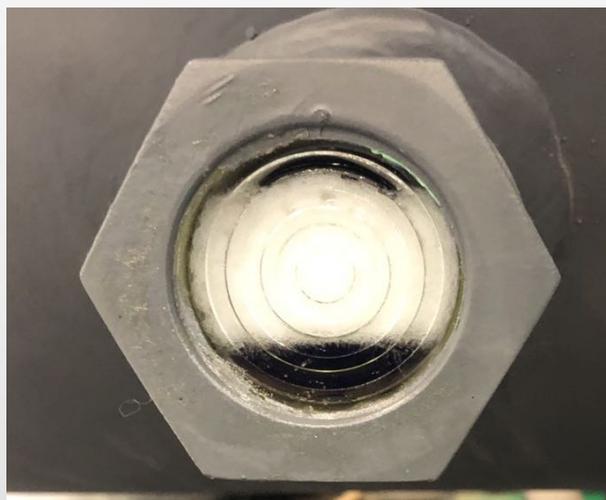
- 介质兼容性：腐蚀性
- 溶解特性：  
液相：高温下部分相溶，低温下不溶  
气相：不容、饱和蒸气压低
- 系统的回油方式
- 充注量、润滑油牌号
- 成本



25°C 下不同油品溶解度曲线图

### 不同润滑油与R290在25°C时的溶解度曲线

摘自：《环保冷媒R290对应冷冻机油的设计研究》



执行标准: API619 fifth edition (ISO10440-1) /API614/ASME/TEMA/GB150

## ➤ 入口分离器

✓ 一般根据末端蒸发器型式及工况波动情况按需配置

✓ 入口分离器: 卧式、立式 根据机组布置选配

✓ 分离效率要求:

## ➤ 高效油分离器

✓ 分离效率:

闭式循环带回油的系统: 分离精度1~3PPM

无回油或回油困难系统: <1PPM

✓ 腐蚀余量: 3mm (API619)

✓ 油分存油容积: 2min retention min/max/normal

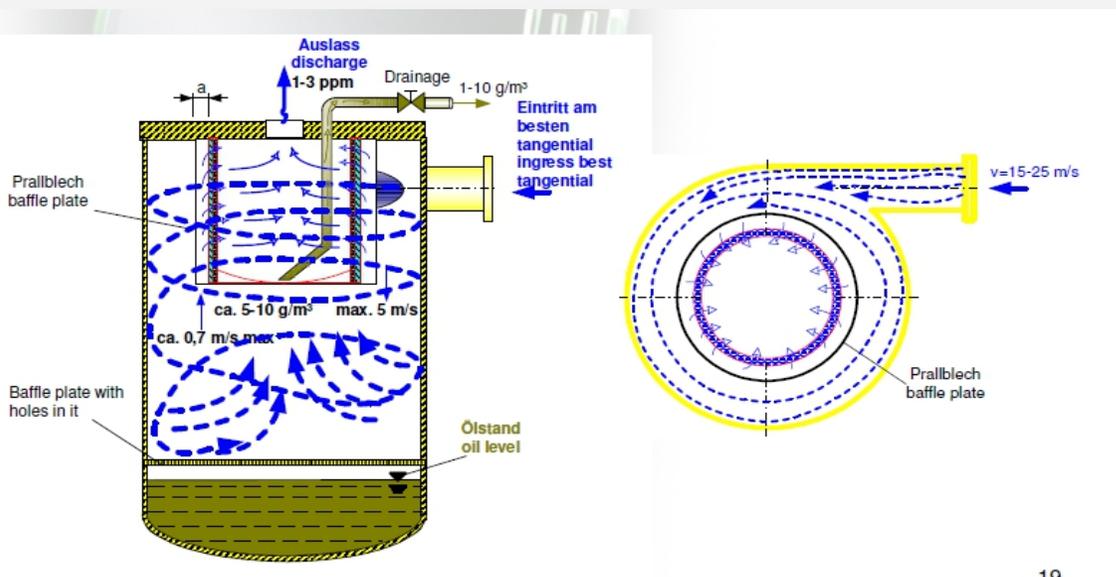
(减少频繁充注及系统故障)

## ➤ 油过滤器

✓ 过滤精度:

轴承、轴封控制系统: 10um/99.5%

转子腔喷油: 供方与买方协商 (20~50um)



执行标准：ASME/TEMA/GB151

高效  
高压  
大型  
化

- 1、**换热管型式及材质**：耐腐蚀性、换热性能  
铜管、碳钢、不锈钢、双相钢
- 2、**高压大型化**：封头形式、焊接结构、吊装结构、  
密封结构选型、应力分析设计
- 3、**腐蚀余量**：碳钢受压元件 R级3.2mm CB级1.6mm
- 4、**静电接地**：每个容器2个两个接地板

## R-1.1.2 TEMAR 级换热器的定义

TEMAR 级换热器机械标准，用于石油及有关工艺过程应用的一般严格要求的非直接接触火的管壳式换热器的设计和制造。

## C-1.1.2 TEMAC 级换热器的定义

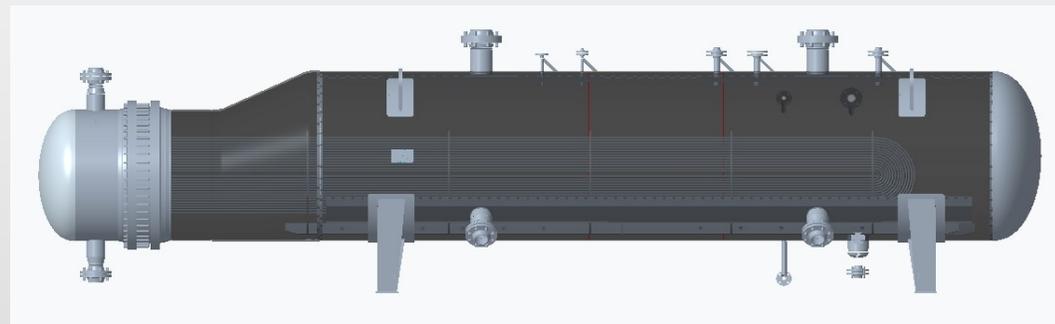
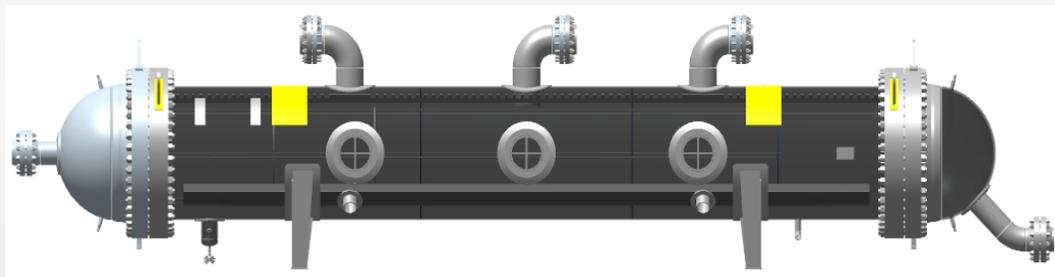
TEMAC 级换热器机械标准，用于商业及一般工艺过程应用的一般中等程度要求的非直接接触火的管壳式换热器的设计和制造。

## B-1.1.2 TEMAB 级换热器的定义

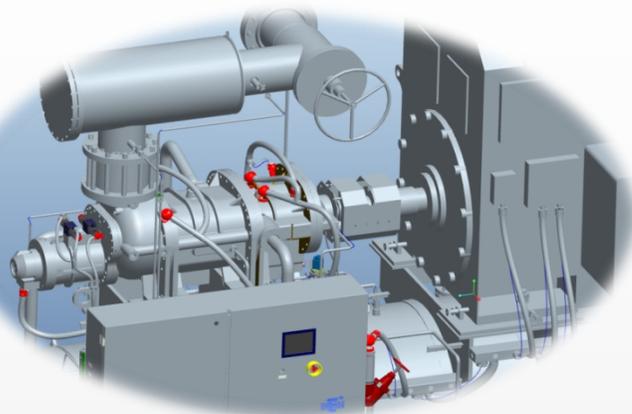
TEMAB 级换热器机械标准，用于化工过程的非直接接触火的管壳式换热器的设计和制造。

特殊  
结构

- 1、**特殊结构**：维护、清洗、更换  
可抽管束、釜式、U型管、浮头式、  
双管板及各种型式的组合
- 2、**选择原则**：结合换热及介质特性、清洁度等因素

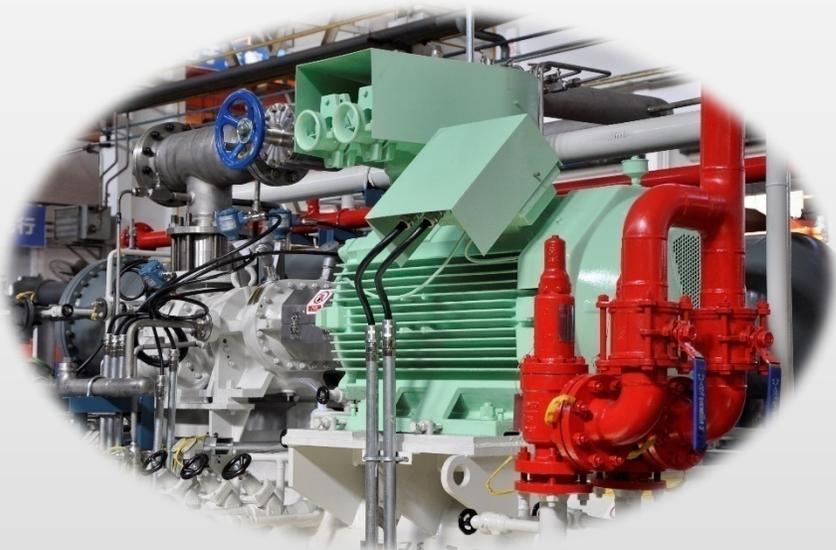


## 完善的控制与保护



- ✓ 在线监测：压缩机轴位移、轴承测温、轴承振动、电机振动
- ✓ 3年不停机可靠运行：油泵、过滤器、滤芯等在线不停机切换
- ✓ 仪器仪表：控制连锁点3取2

## 防爆安全设计



- ✓ 在线浓度监测：在线监测、报警
- ✓ 防爆电气元件或整机防爆认证：CCC认证  
自2019/10/1，防爆电气纳入CCC认证管理范畴；自2020/10/1，未取得认证及未标注强制性标志的，不得出厂、销售、进口或在其他经营活动中使用。  
(市场监管总局关于防爆电气等产品由生产许可转为强制性产品认证管理实施要求的公告)
- ✓ 安全阀的可靠性：API520/API526 回座压力/排放压力上限 (93%/110%)

本质安全、冗余、环境苛刻

**防雷设计：**电气回路满足《防雷标准》，电气回路及仪表通过配置隔离安全栅，保证非防爆区域安全性；

**电动机控制与保护：**变频、软启动、高压直启；

**防爆、高防护性、抗寒、耐高温、耐腐蚀盐雾、**  
电缆的高防护要求  
电缆进出线孔的高密封要求等。



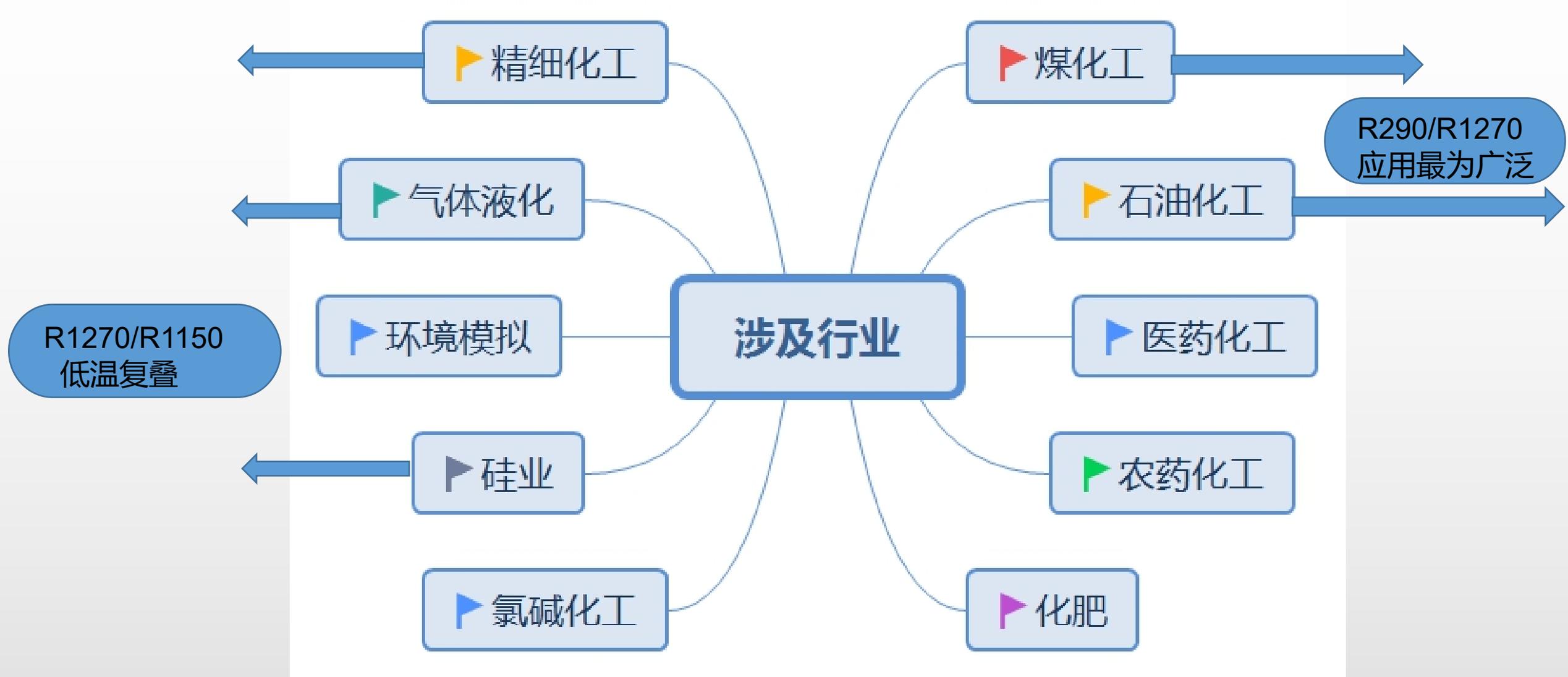
**高配CPU：**西门子1500/1200/400/300，ROCKWELL AB L71 系列；  
**多种个性化通讯协议：**Modbus TCP/IP、Modbus RTU、PROFINET、PROFIBUS 等；

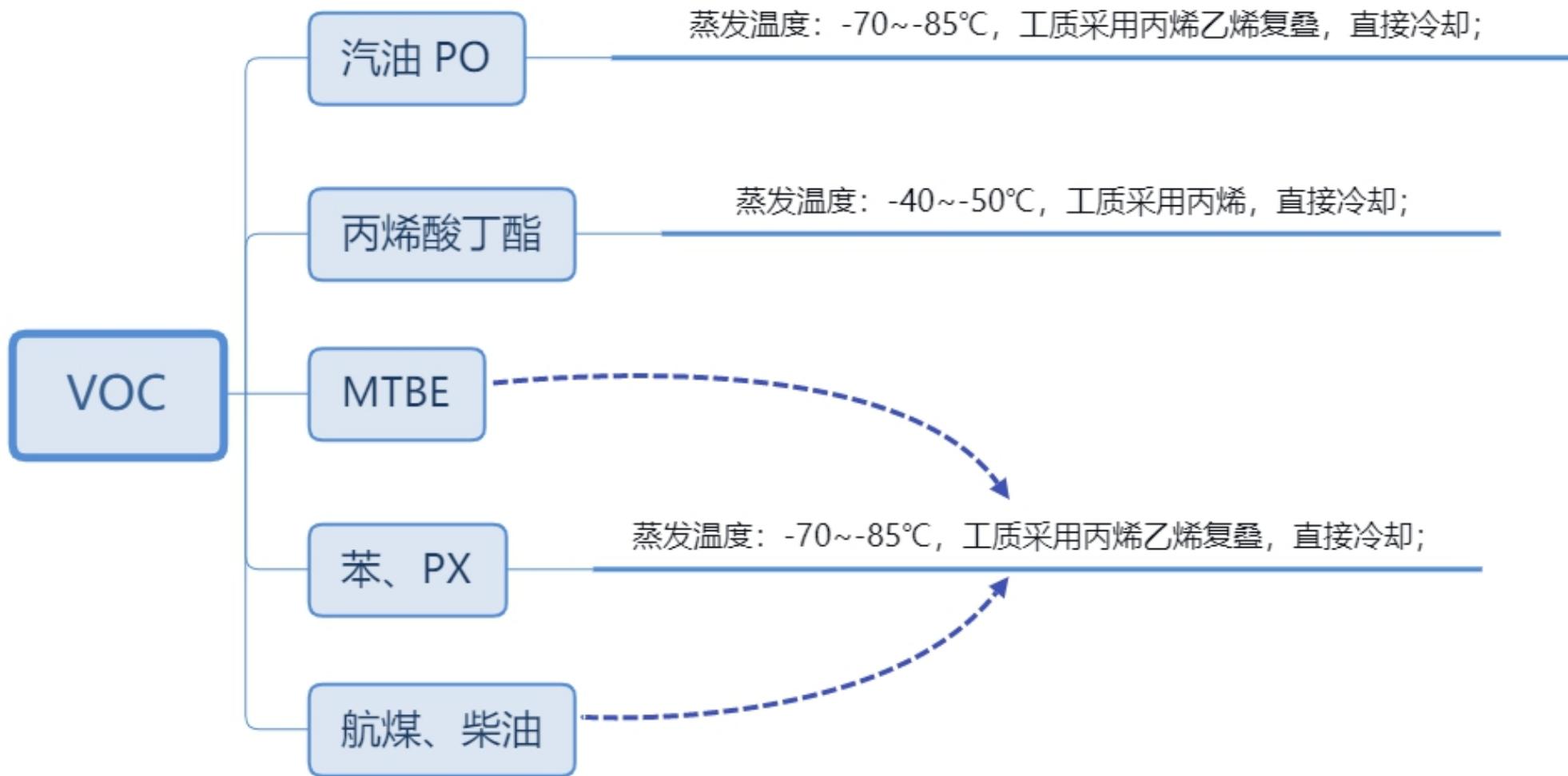
**硬件冗余：**CPU冗余、IO冗余、电源冗余  
**软件冗余：**西门子的SWR 软件包  
**通讯接口冗余**

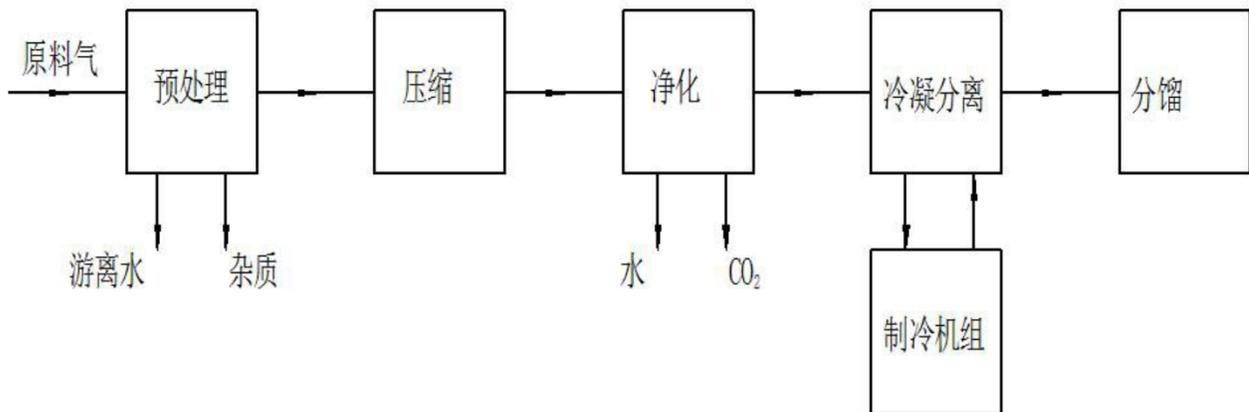
# PART 3

## 典型应用流程及实例

石油化工 · 煤化工 · 多晶硅 · 乙烯苯乙烯







 工艺：通过制冷机组原料气冷却，使其中各组分冷凝成液，从而进行分离回收，同时对尾气进行回热。

项目/参数	单级	双级	复叠	单级或双级
液化温度 $^{\circ}\text{C}$	-20~-40	-40~-50	-50~-90	<-90
制冷剂	R290/R1270	R1270	R1270/R1150 R290/R170	混合冷剂

应用领域：油田天然气处理和轻烃回收。

工艺特点：气体组分复杂，流量波动。

典型应用：

 天然气冷却、天然气液化、轻烃回收

典型案例：

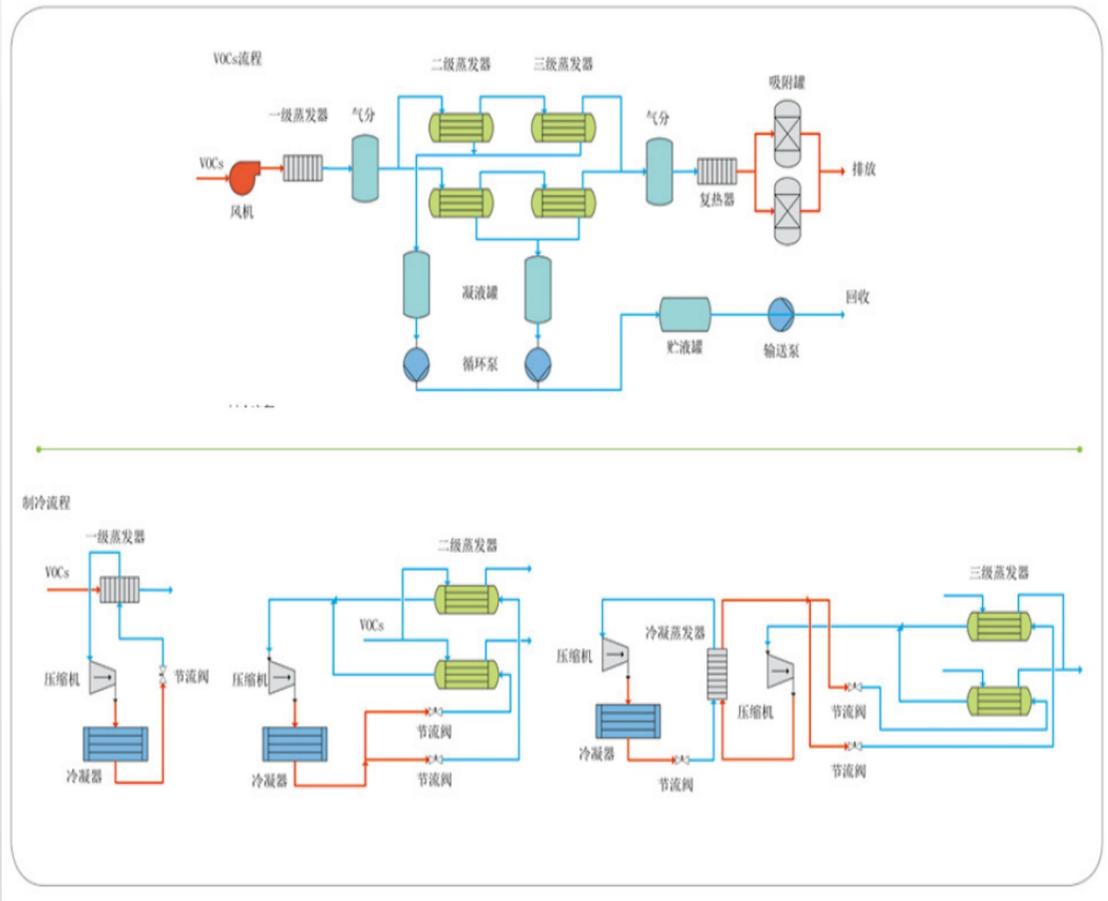
 辽宁某油田公司轻烃回收项目

- ✓ 处理气量最高**15万方/天**，入口温度 $40^{\circ}\text{C}$ ，入口压力 $1.6\text{MPaG}$ ；
- ✓ 一级制冷剂**R290**，二级制冷剂**R290/R170**复叠，装机总功率**560kW**。
- ✓ 一级冷却至 $-20^{\circ}\text{C}$ ，二级冷却至 $-68^{\circ}\text{C}$ ，回温至 $30^{\circ}\text{C}$ ，**C3收率93%**；

 榆林某天然气处理总厂

- ✓ 年天然气处理总量**200亿立方米**；
- ✓ 回收 $\text{C}_2$ 以上组分，年产量**150.2吨**；
- ✓ **R290**制冷机组：4台套，总装机功率**5000kW**

## 工艺流程



🌿 工艺：采用多级连续冷却的方法，使混合气中的各组分温度低于凝点从气态变为液态，除水蒸汽外的空气仍保持气态，从而实现VOCs与空气的分离。

	一级	二级	三级
工况	0/48	-35/+48	-75/-15
制冷剂	R290	R1270	R1270/R1150

- 🌿 应用领域：石化加工行业VOCs治理；汽油储存、运输行业油气回收。
- 🌿 工艺特点：VOCs、油气组分复杂；入口气量，温度，浓度波动范围大；入口含水气，需不停机切换蒸发器进行融霜。
- 应用业绩：某码头装卸船油气回收
- 🌿 汽油油气处理气量2300m<sup>3</sup>/h(Max3000m<sup>3</sup>/h)
- 🌿 浓度35~50%
- 🌿 一级冷却至5℃，二级冷却至-30℃，三级冷却至-70℃
- 🌿 排放浓度小于18g/m<sup>3</sup>,回收效率>96%

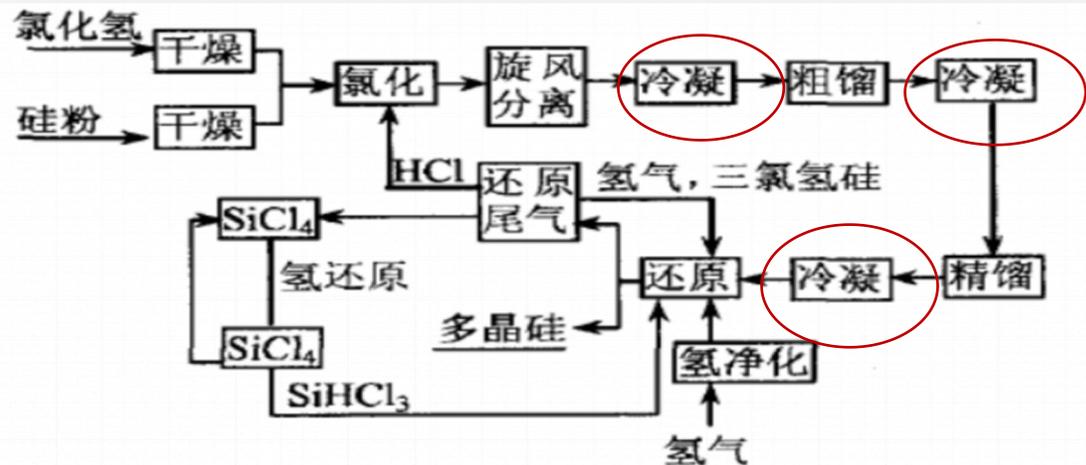


图1 西门子法工艺流程



图2 硅烷法工艺流程

	冷氢化	还原尾气
蒸发温度 $^{\circ}\text{C}$	-30~-45	-55/-65/-90
制冷剂	R1270	R1270/R1150
载冷剂		二氯甲烷

- 应用领域：多晶硅、颗粒硅、硅烷
- 工艺特点：负荷频繁波动且波动范围大，一般考虑备用机及零负荷待机运行以及符合波动引起的回气带液问题等。

应用案例：河南某硅烷、徐州某多晶硅

河南硅烷：R1270/R1150丙烯乙烯复叠

冷氢化： $-33^{\circ}\text{C}$ 丙烯盐水

歧化单元： $-66^{\circ}\text{C}$  /  $-87^{\circ}\text{C}$

总装机功率：810kW/2150kW

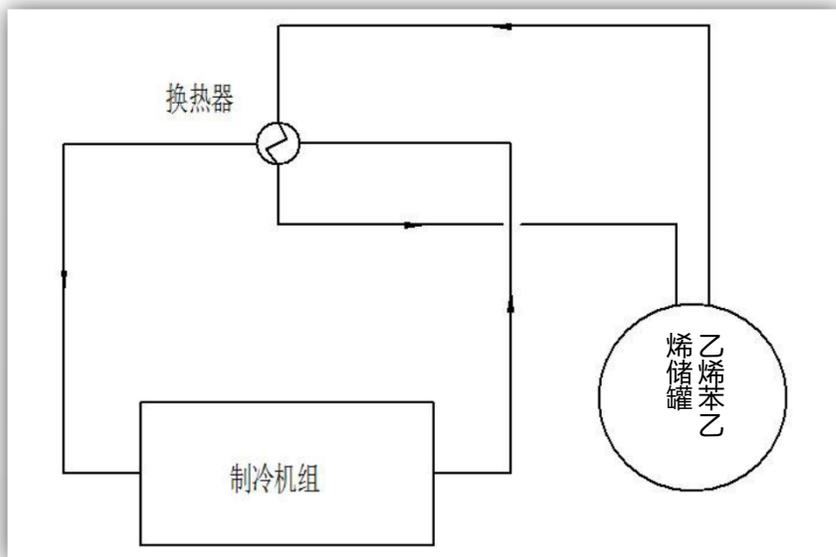
徐州某多晶硅

R507A/R1150复叠系统

蒸发温度： $-90^{\circ}\text{C}$

总装机功率：1600kW

工艺：目前多晶硅工艺中的冷却大都采用直接蒸发或间接冷却，带走不同阶段的反应热。



## 工艺：

- ✓ 乙烯贮罐因冷损失，造成乙烯蒸发形成气体。

乙烯气体通过制冷机组进行冷却冷凝，再返回贮罐。

- ✓ 苯乙烯储存过程中易发生聚合反应

(离子机理/自由基机理)，自由基机理——热激发

一般通过制冷机组维持最佳储存温度，保证苯乙烯的品质。

应用领域：乙烯产品存储运输、苯乙烯罐区保冷。

## 工艺特点：

- ✓ 维持机组需要待机运行，随时启动，频繁启停

- ✓ 乙烯压力 > 2.0MPa，温度~-30~-37℃。

- ✓ 苯乙烯：产品温度10~20℃，出水温度5℃

## 典型应用案例：

宁夏某能源公司/延长某油田乙烯维持制冷机组

- ✓ 乙烯处理量60万吨/年，入口温度-29℃，出口温度-35℃，入口压力2.3MPaG；

- ✓ 制冷工况-40/40℃，制冷剂R1270，装机总功率185kW。

安徽某新材料公司：35万吨/年苯乙烯生产储运

- ✓ 双工况运行：10/5℃乙二醇及40/0℃乙烯液

- ✓ 总制冷量：6400kW，总装机功率2000kW

山东某化工公司：160万吨/年催化裂化项目

- ✓ 2X2万立乙烯储罐：直接蒸发-43℃

- ✓ 总制冷量：1600kW，总装机功率1500kW

**使命：致力于人类生活质量的提高**

**担当：推动自然工质的推广应用，助力中国实现碳中和碳达峰目标，引领中国制冷发展方向**



# 拥抱变化 共赢未来



冰轮环境  
MOON-TECH



冰轮环境公众号



冰轮环境官网

地址：山东省烟台市冰轮路1号

邮编：264002

电话：800-860-2811

网址：[www.moon-tech.com](http://www.moon-tech.com)