

# 2020年中国散裂中子源（CSNS） 靶站谱仪运行年会

## 低温系统

2020年10月22日



# 报告提纲

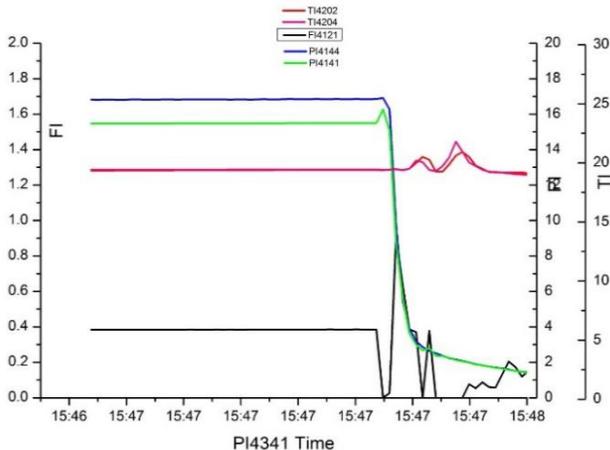
- 运行情况及故障处理
- 氢冷箱改造
- 维护工作
- 压力容器报备

## 运行情况及故障处理

- ◆ 低温系统运行时段**2019年9月19日到2020年1月23日、2020年2月26日至7月15日**。总运行时长**6185**小时，期间发生三次故障，总故障时间**213**小时。
- ◆ **故障1：2019年11月8日15:47**氢循环超压紧急排放导致束流中断，至**11月11日16:22**恢复低温**ready**信号，故障时间约**73**小时，故障原因为氢气补气阀门内漏。
- ◆ **故障2：2020年1月5日7:58**一台液氢循环泵故障停机，因为是双机热备暂时用一台泵维持运行，但不幸**1月16日凌晨02:32**第二台泵故障停机，紧急更换了两台备用泵至**1月19日00:05**恢复低温**ready**信号，故障时间约**70**小时。
- ◆ **故障3：2020年6月11日23:47**一台液氢循环泵故障停机，为了避免重复年初的情况决定主动停机换泵，**6月15日11:00**停机更换了故障液氢泵，至**6月18日8:56**恢复低温**ready**信号，故障时间约**70**小时。
- ◆ 由于液氢流量低在束流功率达到**100kW**后出现了其它问题，其中比较严重的有两个一是掉束后氢循环压力突然降低拉掉了两次低温**ready**信号，二是掉束造成氢循环流量的大幅下降，最低时流量仅为**0.21**升/秒。

## 运行情况及故障处理（续）

- 故障1：2019.11.8下午14:47**氢循环压力突然剧烈上升，压力突破爆破片设置值液氢紧急排。故障后低温组全体组员争分多秒地完成爆破片更换、氦气吹扫、真空置换等工作，并紧急召回了两名出差的同事。**11月9日21:00**开始重新降温。**11月11日16:22**降温完成发出低温ready信号，故障处理用时**73小时**。
- 故障原因：**故障原因不明令心中很不踏实，**11日凌晨**在降温过程中压力突然持续升高被迫长时间放气，待情况稍有改善后现场巡检发现补气阀门**CV5001**内漏！天亮后分析了以前出现的可疑情况后，得出了阀门内漏的结论和临时解决方案。将**CV5001**前端的气动球阀一起进行控制同开同关，之后运行至今年夏季检修期间更换了故障阀门。



故障前后两分钟压力、温度变化



更换爆破片

## 运行情况及故障处理（续）

- 11月11日降温成功后，压力一直呈下降趋势大约每隔一小时补气一次。11月12日早上8点来束流后，压力PI4141从14.05上涨到14.58bara，随后又逐渐下降。
- 通过推断和现场现场排查，确认压力的下降是排放阀CV4150内漏造成的。为了保证继续运行，暂时关闭了CV4150和下游阀门停用此路排放管道。由此带来的负面影响是降温期间和稳定运行期间工况差别很大，为了防止逻辑冲突，使用两套控制方案，界面上切换；
- 今年暑期检修时更换了新阀门问题得到彻底解决。



低温阀门内漏憋压后打开下游阀门排放管道挂霜

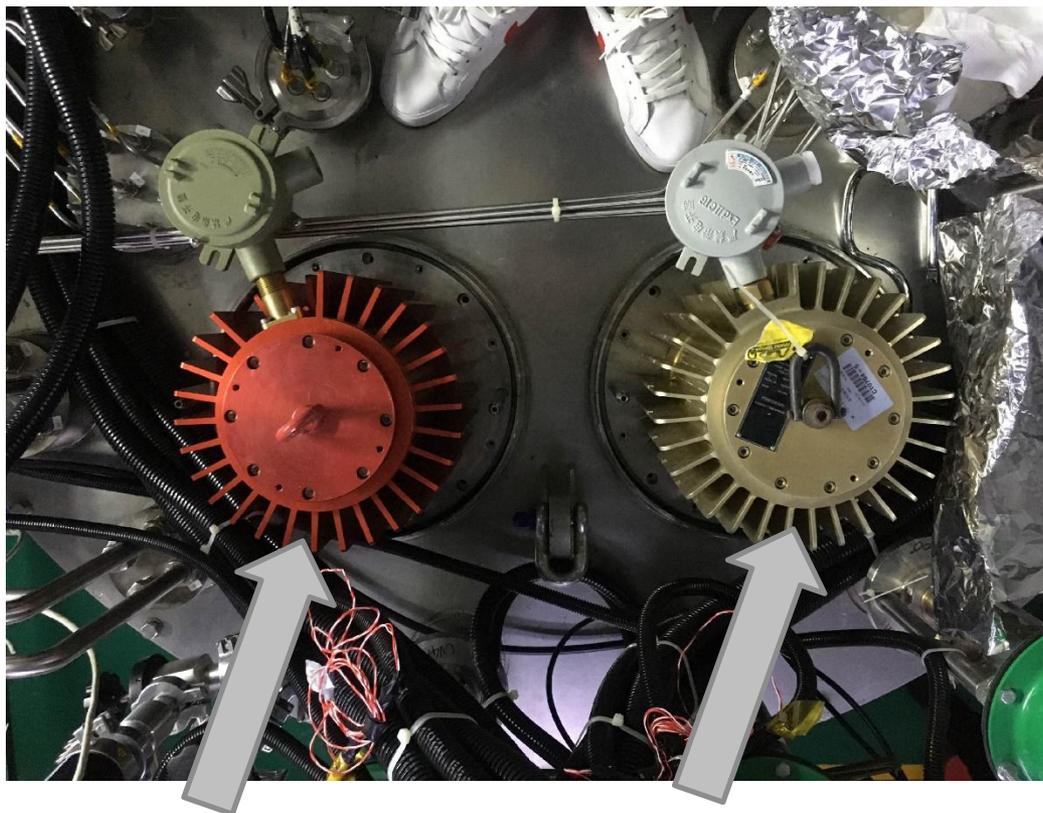


运行期间联锁切换按钮

## 运行情况及故障处理（续）

- **故障2：**氢循环的动力源是液氢循环泵，低温系统采用双机热备的方式工作，建设阶段采购了三台美国**Barber Niclos**的产品**2019**年夏季检修时更换了轴承。美国距离遥远且政治上存在变数，我们一直在做国产化的工作跟国内公司合作生出一台样机，液氢泵的维护工作就交给了国内公司完成。**2020年1月5日**早上**7:58**一台液氢循环泵**P4104**故障停机，采用了一些方法无法重新启动，此时手上有两台备用泵心中有些底气向领导提出了环泵的解决方案，领导们讨论后认为临近运行结束时间先靠单台泵维持运行出现问题再换泵。紧接着**16日**凌晨**02:32**液氢循环泵**P4105**也发生了故障停机。
- **故障处理：****17日**白天复温吹扫后，将两台故障泵分别更换成一台备用进口泵和一台国产泵，随后立刻进行真空置换，并在晚上**22:00**开始降温，**19日00:05**降温成功并发出低温**ready**信号，故障处理用时**70**小时。

## 运行情况及故障处理（续）



国产液氢循环泵

进口液氢循环泵



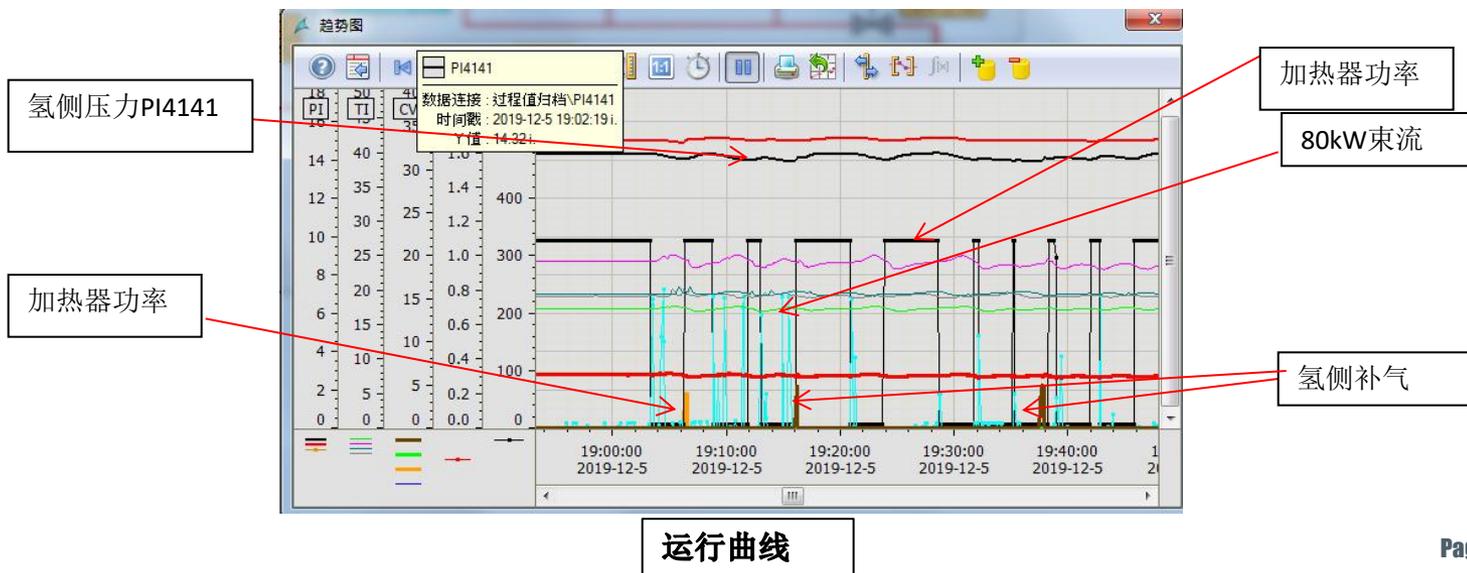
轴承磨合测试

## 运行情况及故障处理（续）

- 故障3与故障2类似，2020年6月11日23:47国产液氢循环泵故障停机，为了避免重复年初的情况决定主动停机换泵，6月15日11:00停机更换了故障液氢泵，至6月18日8:56恢复低温ready信号，故障处理用时70小时。
- 故障2是阀门内漏的问题，先是常温阀门内漏造成停机事故。接着是低温阀门内漏保不住运行压力，好在是发现及时处理得当没有造成停机事故。这些阀门是2013年采购的连放带用到现在发生了不同程度的老化。
- 故障1和3是液氢循环泵故障，问题表象是轴承损坏电机卡死，这对国内厂家提出了新的挑战，进口设备能用一万多小时国产化后就只能用两千五百小时，需要继续摸索逐步提高使用寿命，至少要达到6500小时维持一个完整的运行年度。

## 运行情况及故障处理（续）

- 2019.12.5**低温系统出现**CM**出口温度和**DM**出口温度高报警。查看曲线发现**20:19**，流量有一个脉冲有升高，从**0.31l/s**冲到了**0.42l/s**，正仲氢转化器出口的温度**TI4105**也有一个脉冲，最高冲到了**32K**。
- 研究曲线，发现在**19:00**至**19:50**之间，因为加速器束流的频繁到来与撤销，束流非常不稳定，导致加热器的功率也频繁的点 and 撤，加热器贡献的实际热负荷无法弥补束流的动态热负荷，从而造成了两次氢气补气和一次氦气补气。束流重新到来后就造成了压力升高，氦侧放气，从而造成了流量和温度的脉冲波动。通过优化加热器和氦气排气的逻辑后得到了解决，未再出现这么大的温度波动了。



## 运行情况及故障处理（续）

- **100kW束流功率下低温系统出现了两个问题：**
- **1.束流掉束后造成了氢循环压力突然降低，拉掉了低温ready两次。（3.4凌晨和3.6早上）；**
- **2.束流掉束造成氢循环流量的大幅下降；（3.8从0.43降至0.35,3.11又从0.36降至了0.33L/s，经历3个月的运行流量已经从最初209HZ下的0.47L/s降至250Hz下的0.22L/s，仅为初始流量的1/3）**
- **第一个问题，通过打开氢循环旁通CV1201=2%，加热器功率增加至450W，氢侧放气压力设高成15.5bara后已解决，未再出现掉低温ready的现象。**
- **第二个问题是一个新的问题，以往运行过程中流量都是很缓慢的下降，一个月才降~0.02L/s，而且不会掉束出现突然的下降。暂时还没有很好的解决方法，需要多观察几轮的运行情况。**

## 运行情况及故障处理（续）

- **液氢流量低！**

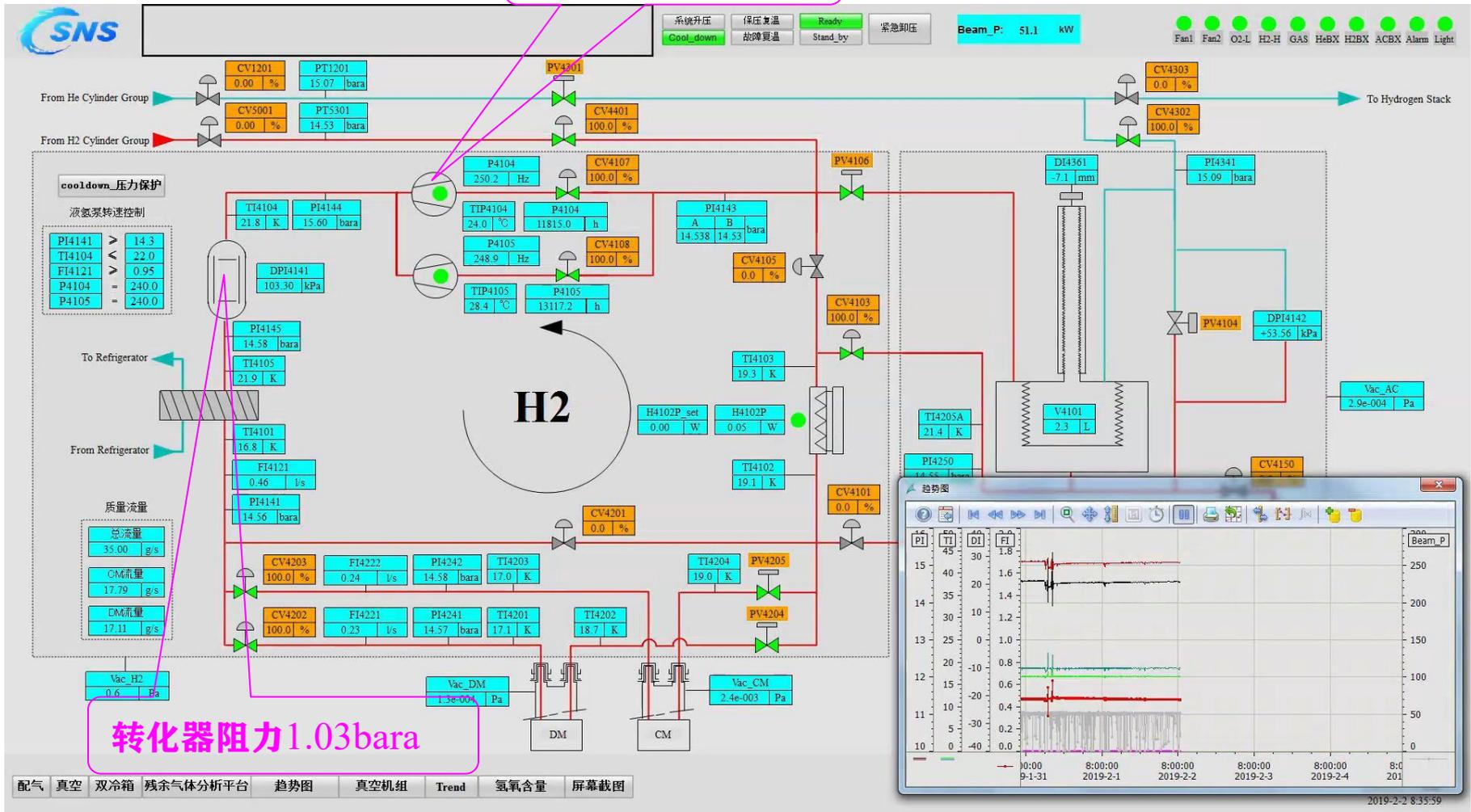
正仲氢转化反应器的阻力:

流量为0.91 l/s时, 阻力为0.83 bar ;

流量为0.41 l/s时, 阻力为1.03 bar ;

存在问题---阻力大, 流量小!

泵压头1.07bara



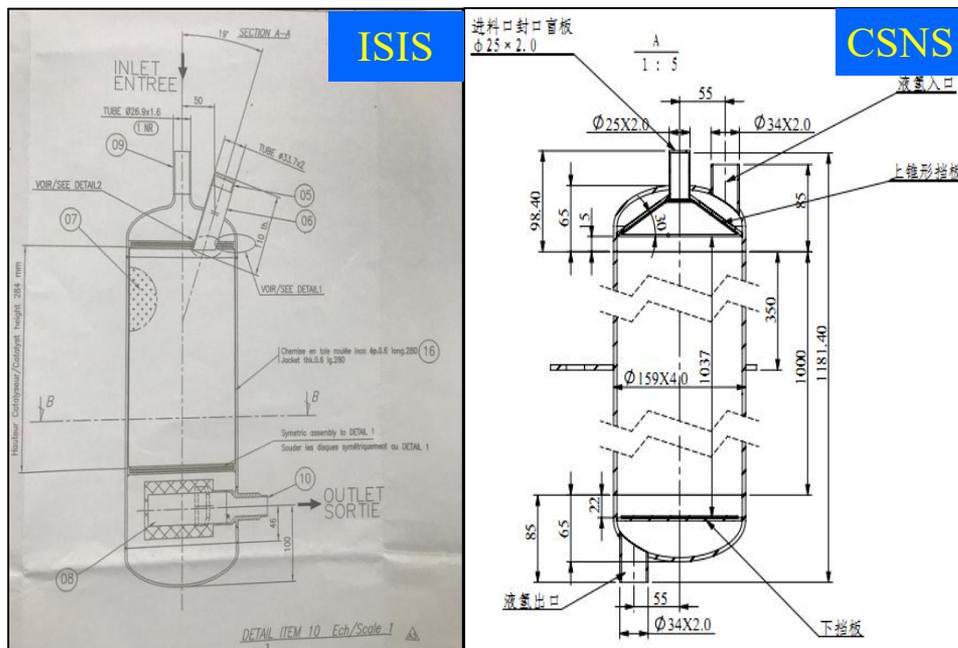
转化器阻力1.03bara

## 原因分析

使用方	丝毡 / $\mu\text{m}$	填充体积 /L	筒体规格 /mm	催化剂填充 量/Kg
CSNS	5	19	159 $\times$ 4	23.2
ISIS	40	5.87	168.3 $\times$ 3	7.7

可能原因:

- 1、自身结构阻力;
- 2、催化剂阻力。



- 方案一：采购法液空产品  $\times$   
方案二：自行优化改造  $\checkmark$

改造思路:

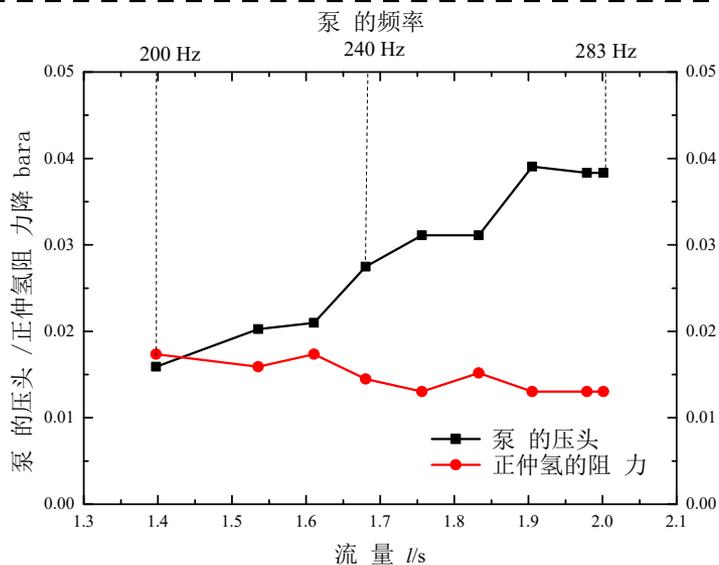
- 确定阻力来源;
- 转化器优化;
- 验证合理性;

## 实验测试-1

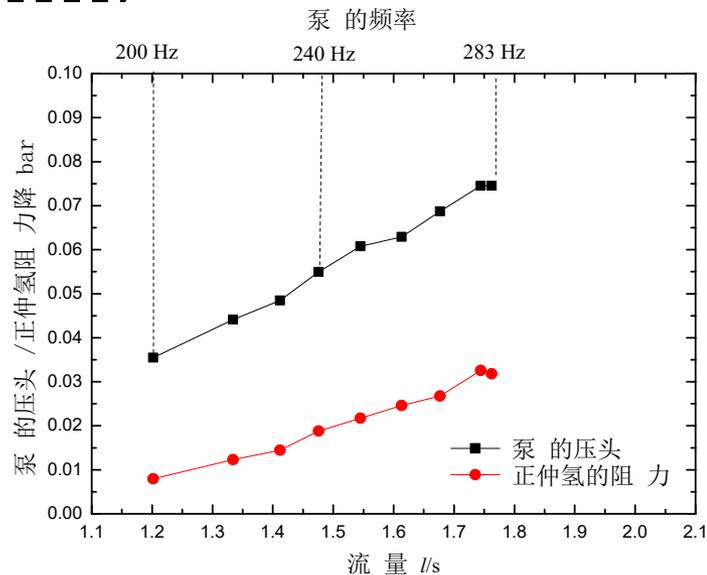
**#1**自身结构阻力测试：现有结构取出催化剂，空容器测试。

**#2**优化结构阻力测试：反应器容积5l，催化剂填充量5.8kg。

实验工况：  
温度：80K  
介质：He



- 1#测试结论：**反应器自身流动阻力为0，循环流量最大到达2l/s，比原来结构增大一倍，证实了容器自身的结构阻力可以忽略不计。



- 2#测试结论：**当循环泵工作频率为283 Hz时，反应器的流动阻力约为0.03bar，循环流量最大约1.767l/s，约原来的2倍。

计算结果表明，减小铁氧体的填充量至5 l，正仲氢的转化能力可以从**98.6%**到99%。

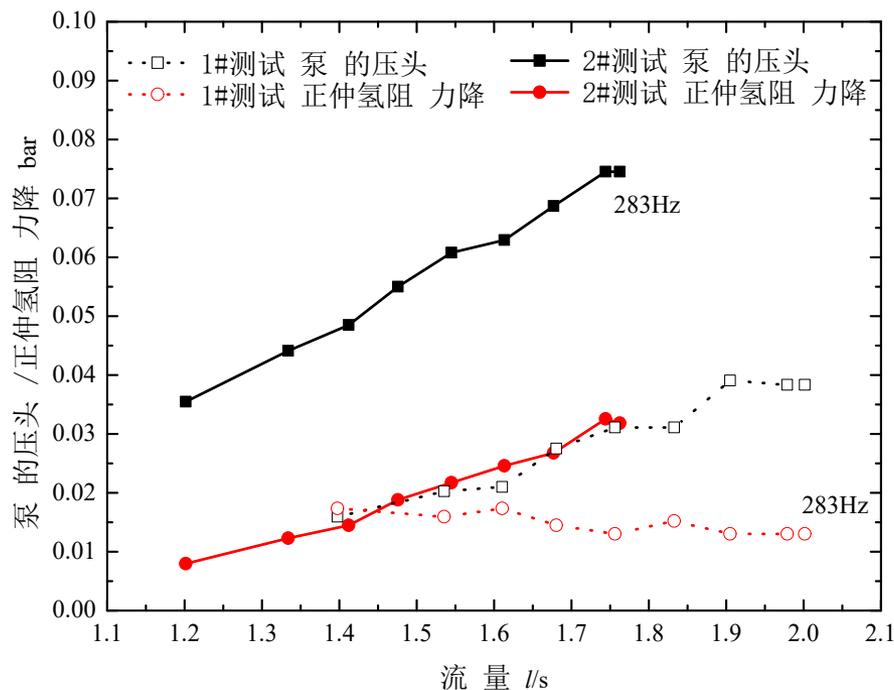
## 实验测试-2

序号	实验工况	正仲氢反应器阻力 bar	循环工质体积流量 /s	泵的频 率 Hz	催化剂填 充量 kg
#0 (2016年)	测试冷箱, He@80 K	0.15	0.9	283	~22
#1 (2019年)	测试冷箱, He@80 K	几乎为0	2.0	283	0
#2 (2019年)	测试冷箱, He@80 K	0.03	1.77	283	~6

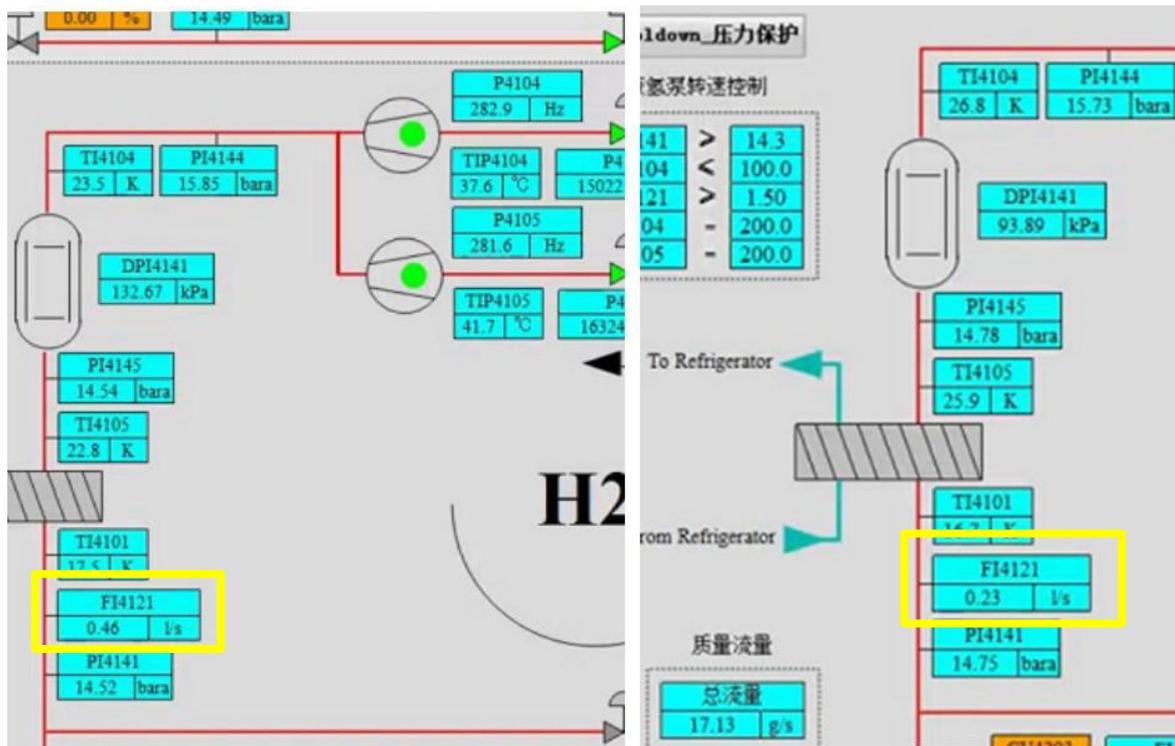
相同测试工况下，阻力减小，流量显著提升。

**测试结论：**

催化剂填充量是阻力的主要来源。



## 正仲氢转化器首次结构优化-减少催化剂用量



降温及运行分析:

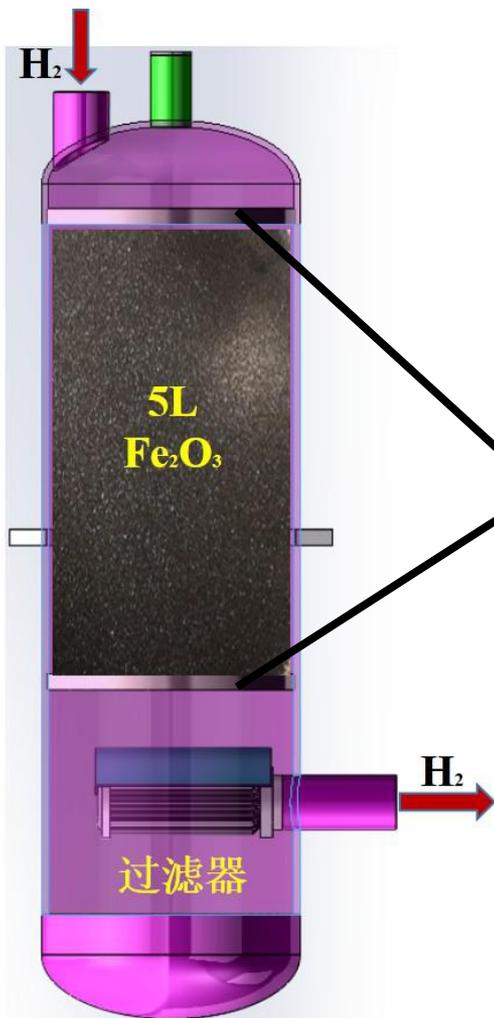
- 1、降温过程总体平稳，不再有大温差以及压力波动。
- 2、34K左右循环流量最大达2l/s，为原来2倍，阻力仅7kPa左右；与80KHe降温相似。
- 3、34K-20K随氢密度的增大，流量逐渐降低，最终降温完成流量0.46l/s(35g/s)。
- 4、随束流波动及运行时间增长，流量缓慢降至0.23l/s。

小结:

- 80K冷氦气跟20K超临界氢物性不同，流动情况不可类比
- 催化剂减少并没有带来大流量
- 继续研究调整改造方向

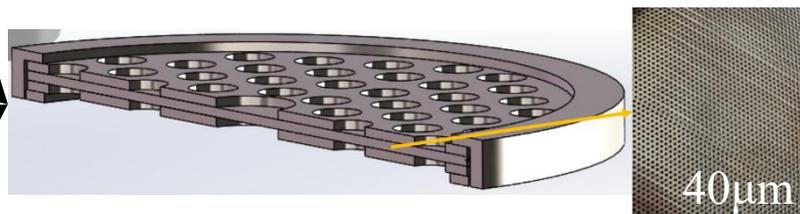
## 正仲氢转化器二次优化-优化滤网结构

介质	H2			H2O		He	
温度/K	300K	33K	20K	300K	373K	300K	80K
粘度/ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	8.98	5.24	15.4	1007	13.3	19.9	8.70
密度/ $\text{Kg}/\text{m}^3$	1.23	47.87	72.98	1.0	0.59	2.45	8.81



结合超临界氢的物性，选择生活中最常见的介质水进行滤水实验：

5 $\mu\text{m}$  烧结板 无法通过  
20 $\mu\text{m}$  非烧结板 顺利流通



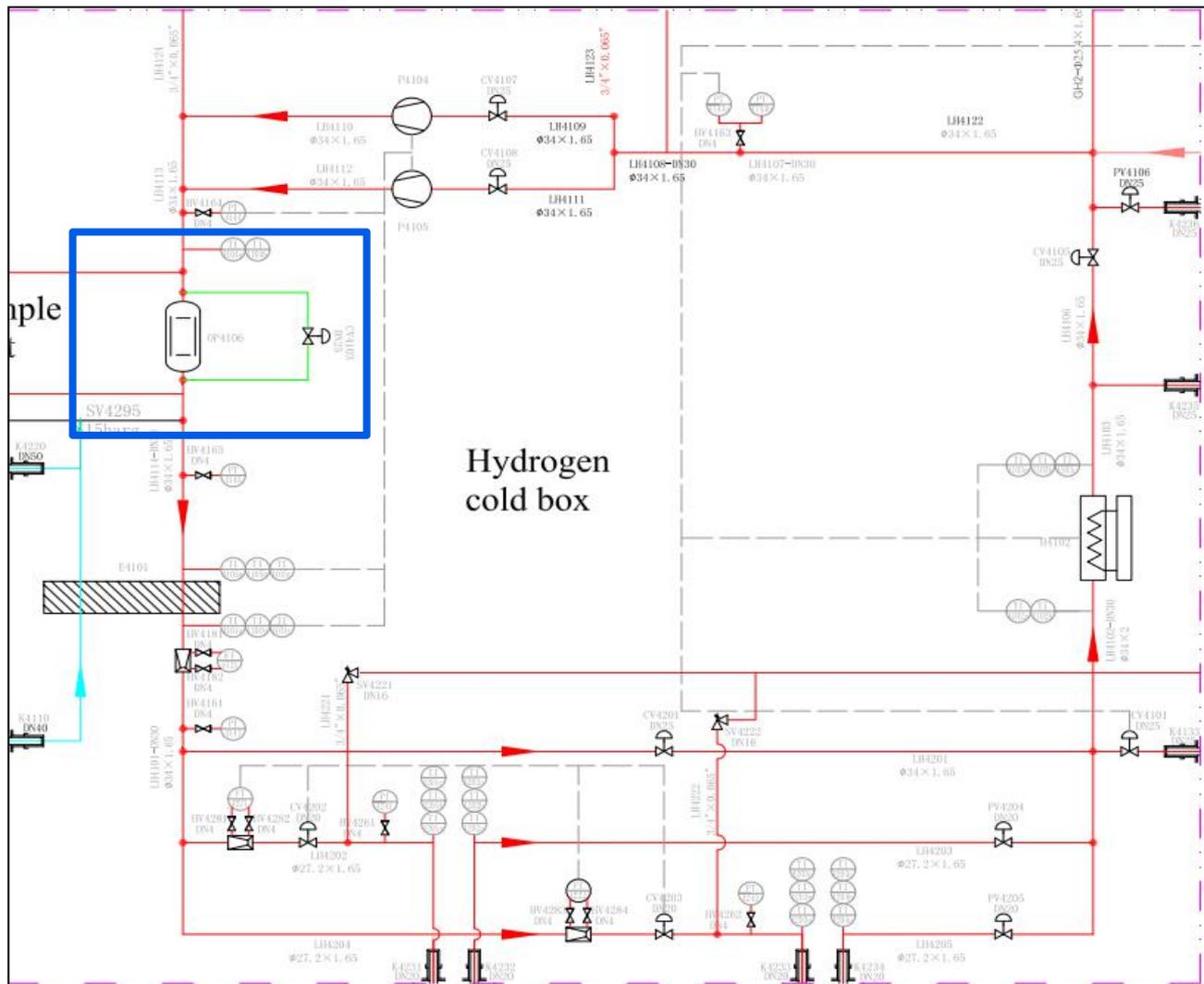
- 三层孔板结构  $\phi 10-\phi 0.04-\phi 10$  (mm)
- 增加出口过滤器防止催化剂掉落影响流体洁净度

2020.06 完成转化器的加工

## 冷箱内部管路优化-1

提高流量的备用方案：

增设转化器旁通阀

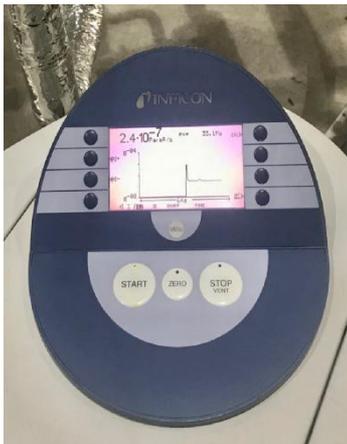


## ❑ 冷箱内部管路优化-2

在最小破坏范围内完成转化器及相关管路的切割、更换工作，压力、漏率测试均合格。



- 管道保压1.5MPa，24h无泄漏；
- 吸枪检测 $2.4 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；
- 温度传感器示数、阀门动作正常；
- 筒体真空漏率合格：  
 $< 5.0 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$



## □ 排放管路优化

运行发现压力缓冲器冷箱排放管道处有结冰现象，从安全运行考虑优化排放管路

:

氢循环冷箱、压力缓冲器冷箱排放针阀下游各增加一个电磁阀，防止低温排放阀门内漏导致氢泄放。



❖ 2019.11.9 氢循环压力飙升，爆破片紧急泄压--阀门CV5001内漏自动补气造成  
为防止自动补气再次引发故障，更换故障阀门以及存在安全隐患的阀门：

氢补气阀门—CV5001、PV5001；

氢补气阀门—CV1001；

氢冷箱排放—CV4101；

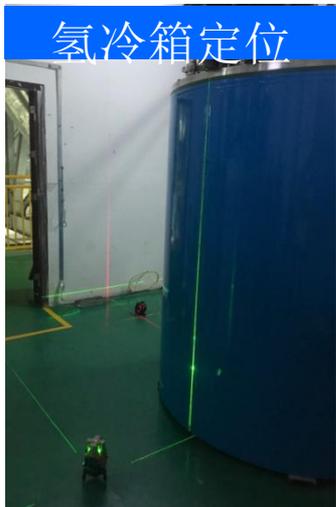
缓冲器排放—CV4150；

氢冷箱旁通—CV4105.



## 氢冷箱复位及管线恢复

氢冷箱定位



6条单通道氢低温管线安装



冷箱定位是改造工作的难点也是重点，氢冷箱连接氢冷箱、压力缓冲器冷箱、CM、DM低温管线，依据预留标记反复调整，预装6条单通道低温管线验证定位，拆装顺畅后安装两条氢低温管线并保压、检漏

氢低温管线安装



常温管线安装



真空机组安装

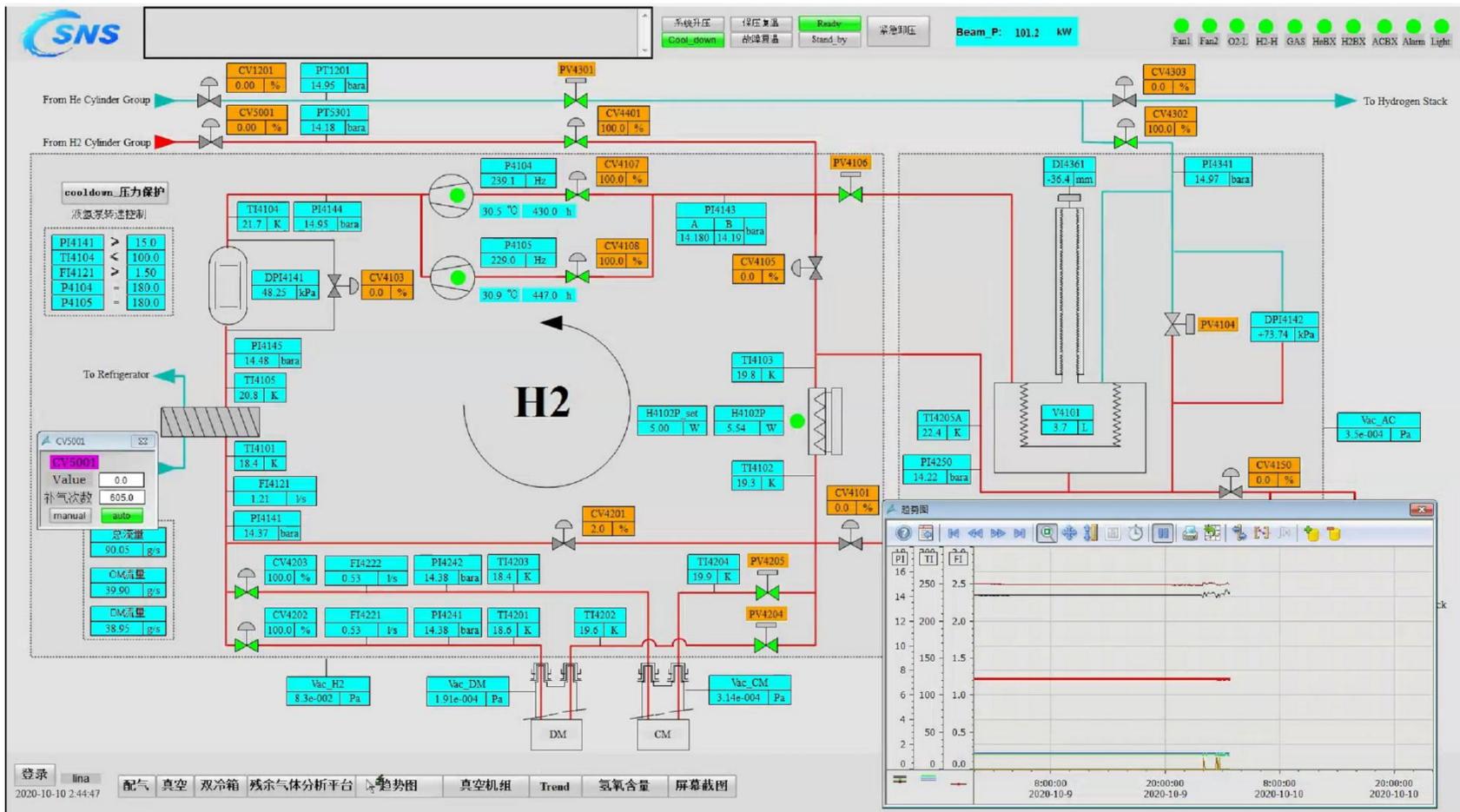


真空机组运行



- ✓ 冷箱定位误差低于2mm，所有设备连接顺畅
- ✓ 恢复冷箱、低温管线真空机组，运行正常；
- ✓ 低温管线抽真空检漏、保压测试均合格。

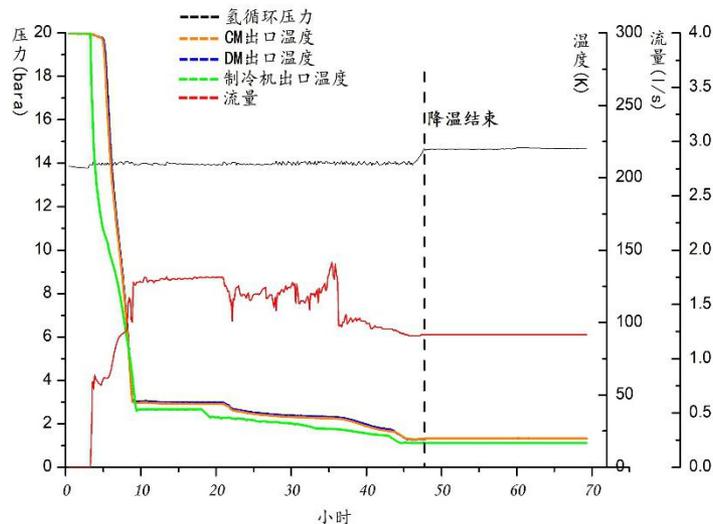
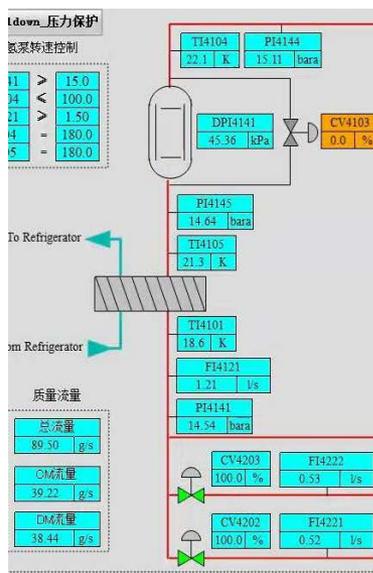
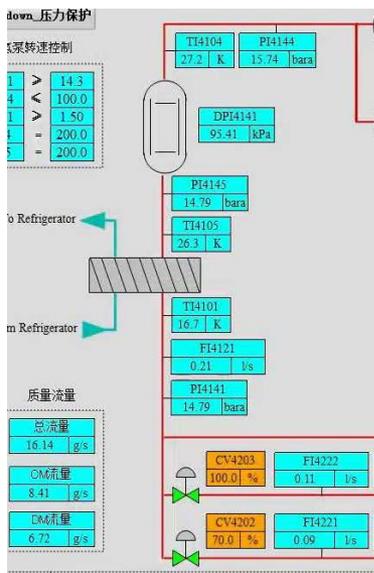
## 优化后降温



- 小结:
- 1、整个降温过程全程无压力波动，温度平稳下降；
  - 2、转化器阻力大幅降低，仅仅是原来的1/2，约46kPa；
  - 3、循环流量增至1.21L/s，质量流量90g/s，约为改造前的3倍。

# 氢冷箱改造

- 液氢流量低是由于正仲氢转化器阻力过大造成的，为了解决这个问题**2018**年进行了制冷机控制改造使得降温过程温度可控，**2019**年改造了正仲氢转化器减少了装填量降温过程平稳了但没有解决根本问题，**2020**年重新设计了正仲氢转化器修正了过滤结构使得阻力大幅度下降。
- 2020年9月22日**开始降温历时**48**小时，过程平稳降温后氢流量**1.21**升/秒，超过了设计指标。困扰了我们三年的问题得以解决。接下来需要观察铁氧体的逃逸情况和来年再降温流量的可重复性。



## 1、压缩机维护

### ◆ 压缩机补油

压缩机运行过程中，润滑油会不断从压缩机密封处缓慢泄漏，每周泄漏量大概180ml。采用真空吸入的方法将油桶中的润滑油吸入压缩机。



每周泄漏量

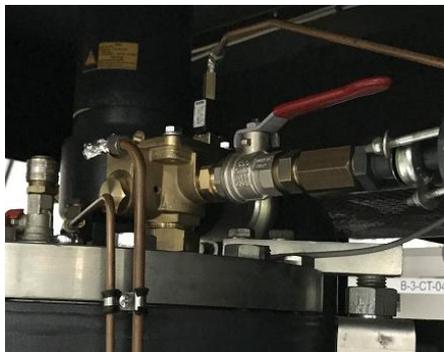


压缩机补油

## 1、压缩机维护

- ◆ 联轴器检查
- ◆ 油气分离筒顶部电磁组合阀更换
- ◆ 更换油过滤器
- ◆ 更换快速接头

以上部件更换之后，通过抽真空和氦检漏的方法，确保压缩机管路漏率满足要求。



更换组合阀



更换滤芯



压缩机管路抽真空

## 2、氨制冷机维护

### ◆ 活性炭更换、再生

油吸附器中的活性炭在长期使用后，吸附了压缩机润滑油，吸附能力下降，需要更换活性炭。活性炭更换采用真空抽取和真空填充的方式。本次填充活性炭357.6kg。

活性炭充填过程中，会吸附空气中的水气，这些水气既影响活性炭的吸附能力，又会影响透平膨胀机的正常运行，所以充填之后通过加热氮气，用高温氮气吹干活性炭中的水分。然后再进行活性炭冷却恢复。



充填活性炭



再生活性炭

## 2、氨制冷机维护

### ◆ 油分离器滤芯更换

在油吸附器前端设有一级油分离器和二级油分离器，一级和二级内部各有4根滤芯，用来吸附压缩机润滑油，需要进行更换。



滤芯

### ◆ 阀门初始化

对所有的气动调节阀进行初始化校验，确保阀门控制准确。



阀门初始化

## 2、氨制冷机维护

### ◆ 透平膨胀机拆装检查

透平膨胀机是制冷机产生冷量的核心部件，运行时高速旋转，同时也是容易损坏的部件。需要拆开透平，检查O圈、叶轮、喷嘴等是否完好。经检查，没有划痕、裂缝等现象，可以继续使用，酒精擦拭后，安装复位。



透平膨胀机拆装检查

## 2、氦制冷机维护

### ◆ 真空泵、分子泵维护

氦冷箱机械泵换油、分子泵更换油池、油分离器内部滤网更换，以保证制冷机真空系统正常运行



分子泵油池更换



油雾分离器滤网更换



机械泵换油

## 2、氦制冷机维护

### ◆ 透平冷却水流量开关检查

目视检查，查看透平冷却水是否有杂质和腐蚀现象。



冷却水流量开关

### ◆ 控制机柜检查、清洁、更换滤网

检查各电器元件是否正常运行，并保持机柜清洁。



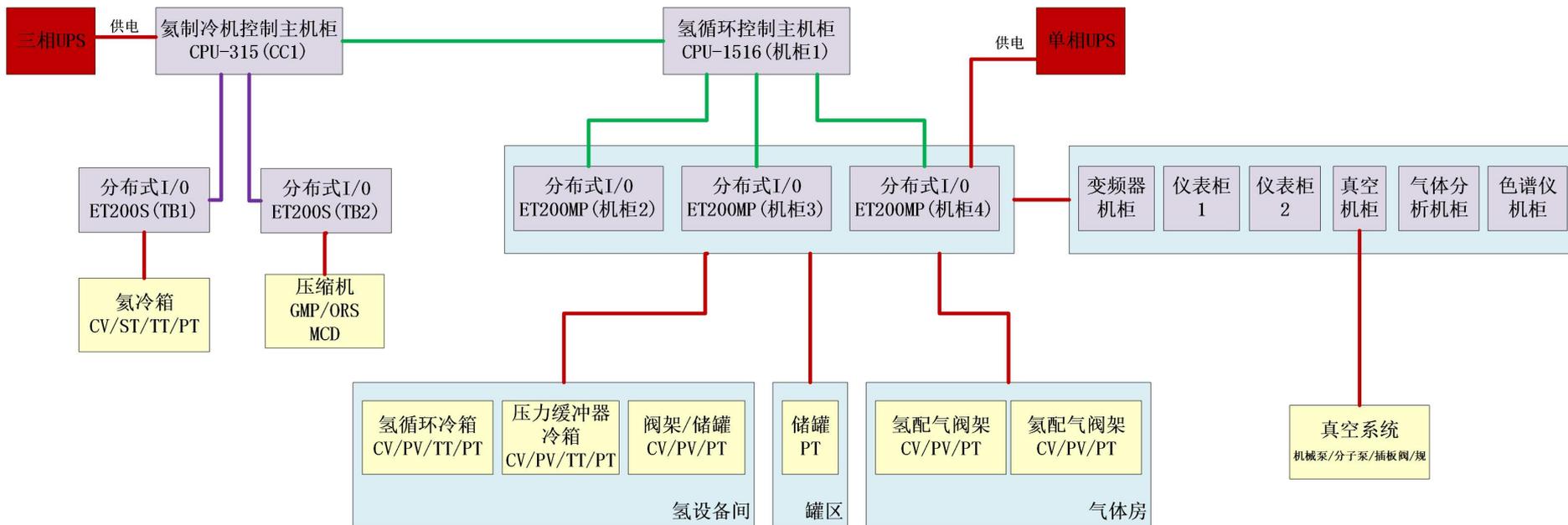
机柜清洁

## 3、控制系统维护

低温控制系统分为制冷机PLC控制子系统和氢循环PLC控制子系统，都是由主CPU机柜+分布式I/O机柜组成，各区域信号就近接入控制机柜。共设置机柜13个。

两套PLC控制机柜都通过UPS供电。

为了保证控制系统正常运行，需要对控制机柜、UPS和控制元器件进行维护保养。



低温控制系统机柜布置图

## 3、控制系统维护

### ◆ 控制机柜维护保养

- 机柜清洁
- 线路检查
- 器件检查
- 器件检查
- 柜体检查

对于有故障或者有输出偏差的元器件，进行更换或者调整，确保控制机柜符合原设计标准



## 3、控制系统维护

### ◆ UPS不间断电源维护保养

#### ➤ 蓄电池更换

低温系统共两套UPS，一套用于氢循环控制系统，一套用于制冷机控制系统。UPS电池已经使用了4年多，根据其寿命3~5年，本次更换了两套UPS的蓄电池，共46节。

#### ➤ UPS主机维护

工作状态检查、运行数据检查



更换UPS蓄电池

## 3、控制系统维护

### ◆ 气动开关阀和气动调节阀维护

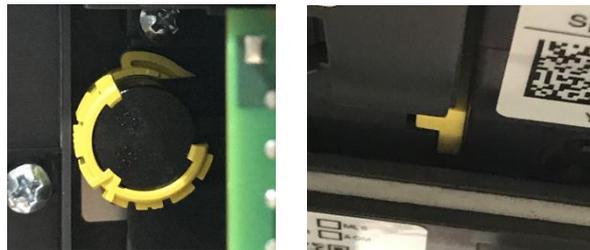
#### ➤ 气动开关阀

本年度增加了2个气动开关阀，机械安装完成之后，进行了动作测试，并对所有的开关阀进行了动作测试。

#### ➤ 气动调节阀

本年度更换了5个气动调节阀，安装完成之后，进行了校准测试，通过调节参数设置和初始化校验，确保阀门控制准确。

并对所有的气动调节阀进行了正反行程的多点测试，对于控制不准确的进行初始化校验。



阀门定位器设置



阀门初始化

## 3、控制系统维护

### ◆ 氢氧含量系统维护

低温系统含有氢气危险介质，需要对各区域的氢气和氧气含量进行准确监测。

#### ➤ 更换氢探头和氧探头

更换了4个氢含量和3个氧含量探头

#### ➤ 探头校准

对探头进行了零点校准、标气校准

#### ➤ 主机校准

对主机输出的4~20mA信号进行校准，保证本地测量值和远程监视值一致。

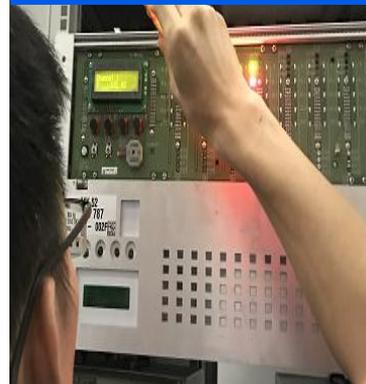
标气校准



探头端校准



主机端校准



输出信号校准



## 压力容器报备

低温系统本年度向东莞特检院申请报备了6个压力储罐以及1条压力管道。具体包括：

- 1、低温厅的油过滤器（710L，工作压力8~13bara）；
- 2、低温厅的2个油分离器（80L，工作压力8~13bara）；
- 3、氦设备间的氦气缓冲罐（0.5m<sup>3</sup>，工作压力15.0bara）；
- 4、氦设备间的氦气缓冲罐（1m<sup>3</sup>，工作压力13.5~14.5bara）；
- 5、制冷机房的空气缓冲罐（0.8m<sup>3</sup>，工作压力6bara）；
- 6、连接压缩机与氦冷箱的压缩机回气管道。  
（61米，φ159，工作压力1.5bara）

## 压力容器报备

目前报备进度：

6个压力储罐已经完成了报备工作，使用登记证等相关资料已经拿到。

压缩机回气管道已经向东莞特检院提交相关资料，特检院人员已经来低温厅现场检查过，等待审核通过发放证书。



油过滤器与  
2个油分离器



氢缓冲罐



氢缓冲罐



空气缓冲罐



压缩机回气管



压缩机回气管  
仪表与安全阀

• 谢谢大家

## 第五轮运行出现的问题

- **10月10日，25kW束流到来后出现了两次拉掉ready的现象，同时有两次氢冷箱真空度过高的报警，现场查看第一次束流到来造成了氢冷箱分子泵的停机重启。**
- **查看曲线发现拉掉ready是氢循环泵入口压力PI4143低于13.8bara造成。原因主要有两个：第一，正仲氢阻力的下降导致，PI4143与PI4141之间有0.2bara的压力差，补气时PI4141是13.9bara而PI4143已经13.7bara；第二，加热器是按100kW束流设计的，开始来束流25kW时，加热器全撤掉，束流功率小，CM和DM的动态热负荷都比加热器小，造成氢循环的压力持续下降。**
- **解决方法：修改ready条件下的PI4143值至13.6bara，屏蔽了分子泵急停的联锁，避免分子泵急停影响系统的正常运行。**