

真空压力控制技术在低温恒温器 高精度温度恒定中的应用

Application of Vacuum Pressure Control Technology in High-Precision Temperature Constant of Cryostat

摘要：针对低温恒温器中低温介质温度的高精度控制，本文主要介绍了低温介质减压控温方法以及气压控制精度对低温温度稳定性的影响，详细介绍了低温介质顶部气压高精度控制的电阻加热、流量控制和压力控制三种模式，以及相应的具体实施方案和细节。

1. 引言

在低温恒温器中，低温介质（液氦和液氮等）温度波动产生的主要原因是沸腾的低温介质顶部气压（真空度）的变化。因此，为了实现低温介质内部的温度稳定，就需要对低温介质顶部的气压进行准确控制。

国内外针对低温恒温器的温度控制大多采用以下三种技术途径：

(1) 主动控制方式：在浸没于低温介质的真空腔里直接引入加热电路，利用温度计对真空腔温度的实时监测数据，与目标温度值进行比较后来控制加入到加热电路中的电流。

(2) 被动控制方式：对低温介质顶部气压进行控制，使低温介质温度稳定。

(3) 复合控制方式：复合了上述两种控制方式，在浸没于低温介质的真空腔里直接引入加热控制电路之外，还同时对低温介质上部的气压进行控制。

电阻加热控温方式已经是一种非常成熟的技术，本文将主要针对低温介质顶部气压控制方式，介绍气压控制精度对低温温度稳定性的影响，以及高精度气压控制的实现途径和具体方案。

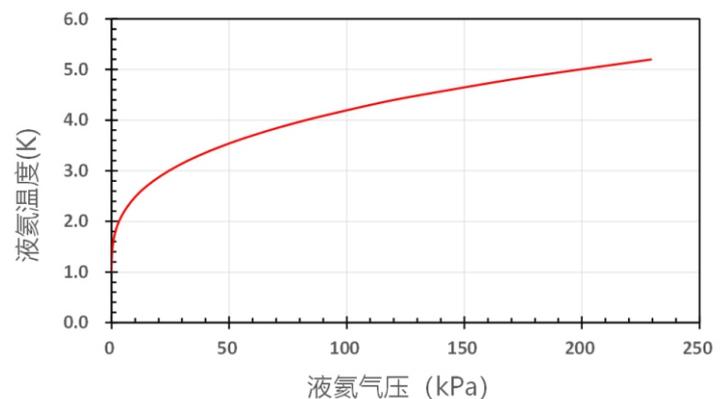


图1 液氮饱和蒸气压与温度关系曲线

2. 气压控制精度与温度稳定性关系

以液氮为例，液氮的饱和蒸汽压与对应温度变化曲线如图1所示。

由图1可以看出，在很小的温度范围内，上述曲线可以用直线段来描述，所以可以得到4K左右的温度范围内，气压大约100Pa的波动可引起1mK左右的温度波动。由此可以认为，如果要实现1mK以下的波动，气压波动不能超过100Pa。

3. 顶部气压控制的三种模式

低温介质顶部气压控制一般采用三种模式：电阻加热、流量控制和压力控制。

3.1 电阻加热模式

在低温恒温器的恒温控制过程中，电阻加热模式是在低温介质中放置一电阻丝加热器，如图2所示，真空计检测顶部气压变化，通过PID控制器改变加热电流大小来调节和控制顶部气压，将顶部气压恒定在设定值上。从图2可以看出，电阻加热模式比较适合增加顶部气压的升温控温方式，但无法实现减压降温。

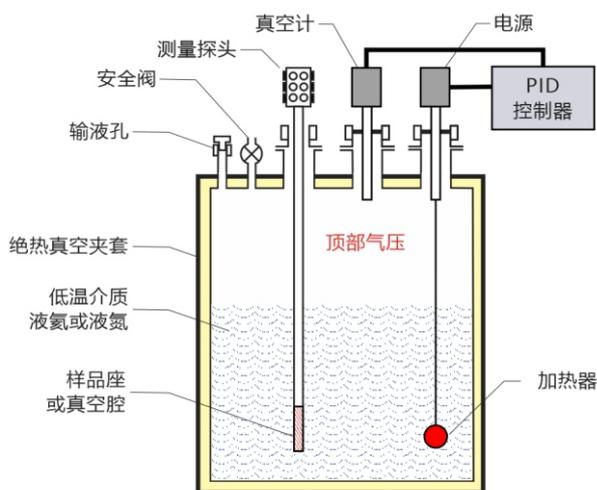


图2 电阻加热模式示意图

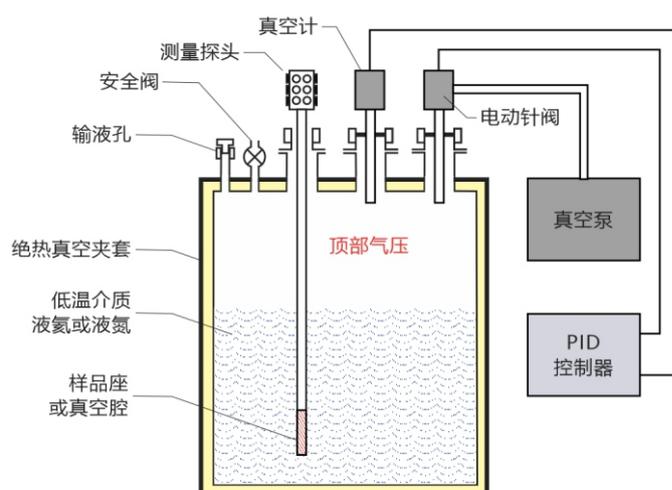


图3 流量控制模式示意图

3.2 流量控制模式

流量控制模式是一种典型的减压降温模式，如图3所示，真空泵按照一定抽速连续抽取低温恒温器来降低顶部气压，真空计、电动针阀和PID控制器构成闭环控制回路，通过电动针阀调节抽气流量使顶部气压准确恒定在设定真空度上。由此可见，流量控制模式比较适合降低顶部气压的降温控温方式，但无法实现增压升温。另外流量控制模式中，真空泵的连续抽气使得低温介质的无效耗散比较严重。

3.3 压力控制模式

压力控制模式是一种即可增压也可减压的控温模式，如图4所示，当采用真空泵抽气时为减压模式，当采用增压泵时为增压模式，由此可实现宽温区内温度的连续控制。所采用的调压器自带一路进气口（大气压），结合真空泵在对顶部气压进行恒压控制的同时，可有效避免低温介质的大量无效耗散。

另外，这里的增压方式也可以采用低温介质中增加电加热器来实现。

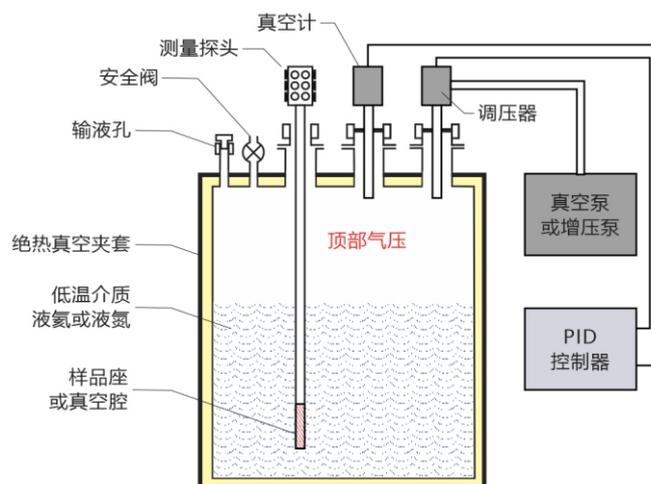


图4 压力控制模式示意图

4. 其他实施细节

在上述三种控制模式实施过程中，还需特别注意以下细节：

(1) 真空计的选择

真空计是测量顶部气压变化的传感器，是决定低温恒温器温度控制稳定性的关键，所以一定要选择高精度真空计。

目前高精度真空计一般为电容薄膜规，一般整体精度为0.2%。

如前所述，在液氮4K左右的恒温控制过程中，要求气压波动不超过100Pa，及 $\pm 50\text{Pa}$ ，如果对应于100kPa的气压控制，则真空计的精度要求需要高于 $\pm 0.05\%$ 。由此可见，对于温度波动小于1mK的恒温控制，还需要更高精度的真空计。

(2) PID控制器的选择

在恒温控制过程中，PID控制器通过A/D转换器采集真空计的测量值，计算后再将控制信号通过D/A转换器发送给执行器（电动针阀、调压器和加热电源等）。为此，要保证能充分发挥真空计的高精度和控制的准确性，需要A/D和D/A转换器的精度越高越好，至少要16位，强烈建议选择[24位高精度的PID控制器](#)。

(3) 调压器的配置

调压器是一种集成了真空压力传感器、控制器和阀门的压力控制装置，但真空压力传感器的精度远不如电容薄膜规，控制器精度也比较低。为此在使用调压器时，要选择外置控制模式，即采用电容薄膜规作为控制传感器。

另外，需要特别注意的是，调压器中控制器的A/D和D/A转换器精度较低，因此对于高精度和高稳定性的顶部气压控制而言，不建议采用控压模式，除非采用特殊订制的高精度调压器。