

电动针阀和电气比例阀在流动液氮气体 低温温度控制中的应用

Application of Electric Needle Valve and Electric Proportional Valve in Low Temperature Control of Flowing Liquid Nitrogen Gas

摘要：为了解决室温至液氮温区温控系统中需要昂贵的低温电动阀门进行液氮介质流量调节的问题，本文提供了三种不同精度的液氮温区内的低温温度控制解决方案。解决方案的技术核心是通过采用电动针阀和电气比例阀在室温环境下来快速调节外部气源流量或压力大小以实现低温温度的精准控制，不再需要具备耐低温性能的低温阀门。同时，在上述两种技术方案的基础上增加了电加热形式的第三种解决方案，可实现更高精度的低温温度快速控制。

1. 问题的提出

对于液氮温度范围内的低温温度控制，目前常用的方法为以下两种：

(1) 直接浸泡式：即试验件完全浸泡在液氮内进行降温冷却和相应的温度控制，但采用这种方式时试验件的冷却温度无法在较宽泛的低温温区内进行控制和调节，只能在接近-196°C的温度附近通过控制液氮气压来进行小范围的调节和控制。另外，直接浸泡法往往未等试验件达到冷却保温时间，液氮已基本完全挥发。同时，这种操作方式较为简陋，对实际操作人员要求较高，稍有不慎将会有安全事故发生。

(2) 液氮吹扫法：即直接采用流量可控的液氮或液氮气体进行吹扫来进行试验件低温温度调节和控制。在采用吹扫法进行低温温度控制时，液氮或液氮气体的流量大小直接关系到试验件温度的稳定性和可靠性。同时，低温介质的流量控制一直是行业的难点和痛点，这要求低温管路中的流量控制阀内的各个元器件均需要很好的耐低温特性，且价格十分昂贵。有些简陋的低温控制采用了低温开关阀进行通断式控制，尽管降低了阀门成本，但这种开关控制模式的控制精度极差。另外，低温介质的出口与试验件或热交换器内的空气直接接触，空气中的水蒸气遇冷急剧结冰，随着降温时间增长，低温介质的出口很容易被结冰堵塞。现亟需研发一种核心控制器件在常温状态下便可实现超低温控制的试验装置。

为了解决上述液氮吹扫法中存在的问题，本文提供了三种不同精度的液氮温区宽量程温度控制解决方案。解决方案的技术核心是通过调节室温环境下的气源流量或压力大小来实现低温温度的精准控制，不再需要控制阀门具有耐低温性能。同时，在上述两种技术方案的基础上将增加电加热形式的第三种解决方案，由此可实现更高精度的低温温度控制。

2. 原理和分析

在传统液氮低温温度控制的吹扫法中，普遍是直接调节液氮低温介质的吹扫流量，同时结合温度传感器和PID控制器形成闭环控制回路，通过对流量的控制最终实现低温温度控制。

通过分析上述的传统液氮吹扫法可以发现，实现低温介质吹扫的基本原理是在液氮罐（杜瓦瓶）内形成较高的气压迫使液氮或液氮气体溢出到设定管路内形成低温介质流动，最终再通过调节流动速度来进行低温温控。因此，液氮罐中的高压气体是所有这些的关键，只要能调节气体压力，同样能在固定管路内形成不同流速的低温介质而达到控温目的。同时，这种调节液氮罐内气体压力的方式可在室温环境中实现，这样就可以避免在直接低温介质流量控制中需要使用特殊且昂贵的电动低温调节阀。

基于上述分析，本文设计了以下三种低温温度控制方案，并可实现不同的控制精度。

3. 进气流量控制方案

对于任何具有一定空间大小的容器而言，其内部压力都可以归结为进气和出气流量所达到的一种动态平衡状态。因此，如果要对液氮罐内的气体压力进行控制，有效的方法之一就是对其进出的气体流量分别进行调节使其达到动态平衡。

需要注意的是，在实际低温温度控制系统中，液氮罐的出液口或出气口往往直接与试验件的冷却管路连接，若在液氮罐出口处对低温介质流量进行直接控制又会需要使用低温阀门，因此这时可以基出口口径不变而不对流量进行调节，只调节液氮罐的进气流量。具体方案如图1所示。

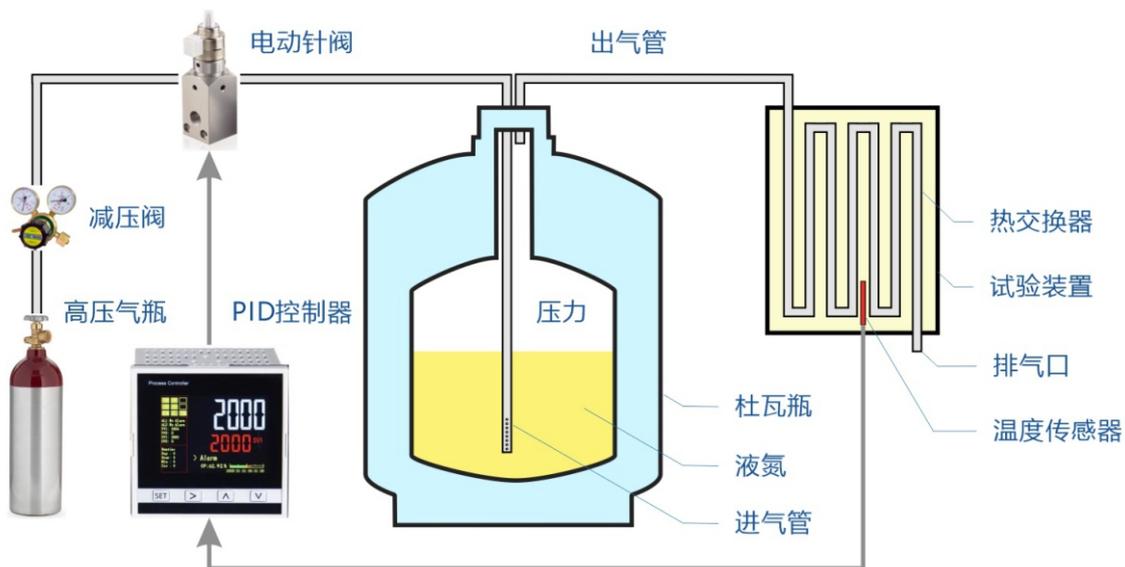


图1 采用电动针阀调节流量的低温冷却试验装置温控系统结构示意图

从图1可以看出，高压气体（一般为氮气）经过减压阀形成固定压力的气体，此室温高压气体流经电动针阀和进气管进入杜瓦瓶中的液氮中。室温高压气体进入液氮后使液氮形成蒸发而挥发为气体，挥发气体在使密闭杜瓦瓶中压力逐渐升高的同时，通过出气管流经试验装置中的热交换器后排出。由此可见，通过调节安装在进气管路上的电动针阀，针阀开度越大，进气口流速越快，液氮挥发越激烈，杜瓦瓶中的压力越高，最终使得流经热交换器的低温介质流速越快，相应的降温速度也越快。此方案的另一个主要特点是电动针阀可以在室温下工作。

由此可见，这种在室温下通过调节进气流量的解决方案是通过电动针阀、温度传感器和PID程序控制器构成了一个低温闭环控制回路，从而可实现低温温度的定点控制或程序控制。但这种方案存在的问题是控温精度较差，一般会有2~5℃的温度波动，主要原因如下：

(1) 由于一定流量的高压气体使得杜瓦瓶内的压力产生变化，压力的改变又使得冷却介质的流量发生改变，这个升华过程和压力变化过程比较复杂，这使得进气流量与压力以及压力与温度并不是一个简单的线性关系，这都是造成温度控制不准的主要因素。除非整个调节过程的速度非常快，但实际往往是个慢速过程。

(2) 这种仅仅采用低温介质进行温度控制的技术手段存在降温快而升温慢的弊端，一旦实际温度超过设定点温度，往往需要试验件缓慢散冷才能实现回温，这也是造成低温温度控制很难实现较高精度的另一个主要原因。

4. 进气压力控制方案

为了解决上述流量控制过程中存在的压力不稳定问题，本文提出的另一个解决方案就是直接对杜瓦瓶中的压力进行控制，即采用对高压气体进气口压力的调节和控制来实现杜瓦瓶内部压力的精确控制。具体方案如图2所示。

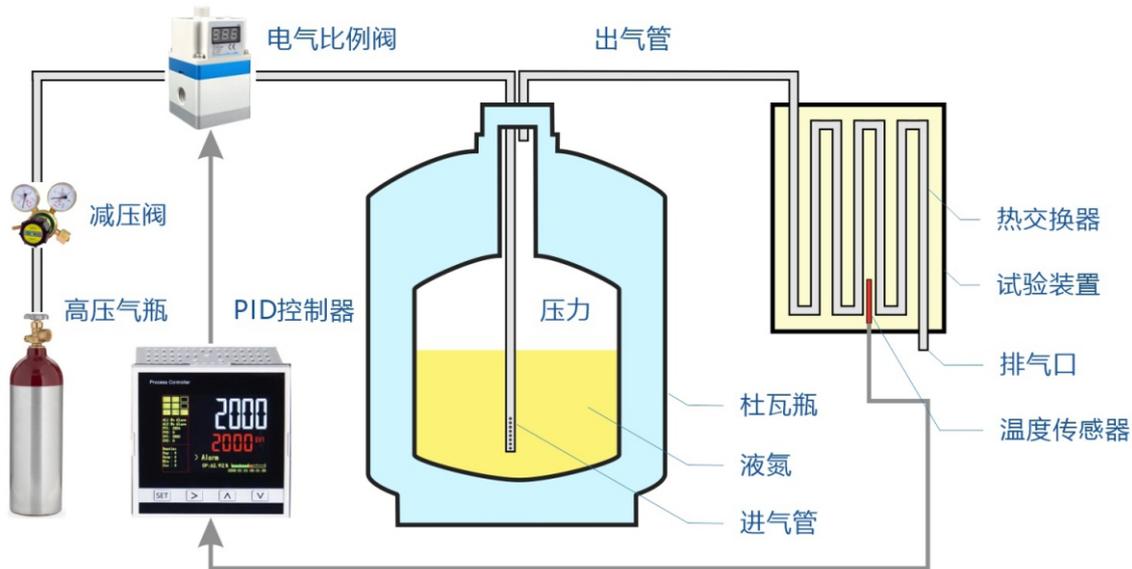


图2 采用电气比例阀调节压力的低温冷却试验装置温控系统结构示意图

从图2可以看出，高压气体经电气比例阀在进气口处按照设定值进行压力控制，由此保证杜瓦瓶中的压力始终处于准确受控状态。通过电气比例阀、温度传感器和PID程序控制器构成的双闭环串级控制回路（其中电气比例阀为辅助控制回路，PID控制器与温度传感器和电气比例阀构成主控回路），通过调节比例阀的输出压力进而控制杜瓦瓶内的气体压力，杜瓦瓶中的压力越大，使得流经热交换器的低温介质流速越快，相应的降温速度也越快。由此，通过PID控制器自动根据设定点或设定程序来调节杜瓦瓶中的气体压力，从而可实现低温温度的更准确控制，规避了复杂得升华过程带来的控制不确定性。

与前述流量控制方案相比，压力控制方案的结构同样十分简单，提高了温控系统的控温精度，同时还保留了可在室温下进行调节的优势。

压力控制方案的另一个突出优势是可以进行大尺寸试验件的低温控制，这主要是由于大尺寸液氮杜瓦瓶内的压力控制要远比流量控制更为简便和准确，而流量控制方案会受到电动针阀口径大小对流量调节范围的限制，大口径针阀较慢的响应速度也会给温度控制带来误差。

尽管压力控制方案是流量控制方案的升级，也提高了控温精度，但还是没有解决单一冷却方式存在的冷却快但回温慢的弊端，还存在控温精度比较有限和控温速度较慢的问题。

5. 电加热辅助进气压力控制方案

为了彻底解决单一冷却方式存在的冷却快但回温慢造成控温精度不高和速度较慢的问题，本文提出了另一个优化方案，即在进气压力控制方案的基础上，在试验件上增加电热器以提供加热功能，由此提供一个主动加热装置配合冷却系统形成冷热双作用系统，在试验件温度低于设定值时自动主动加热形成微调，这样既可以实现温度快速回温达到设定值提高控制速度，同时还可以大幅度提高控温精度。具体方案如图3所示。

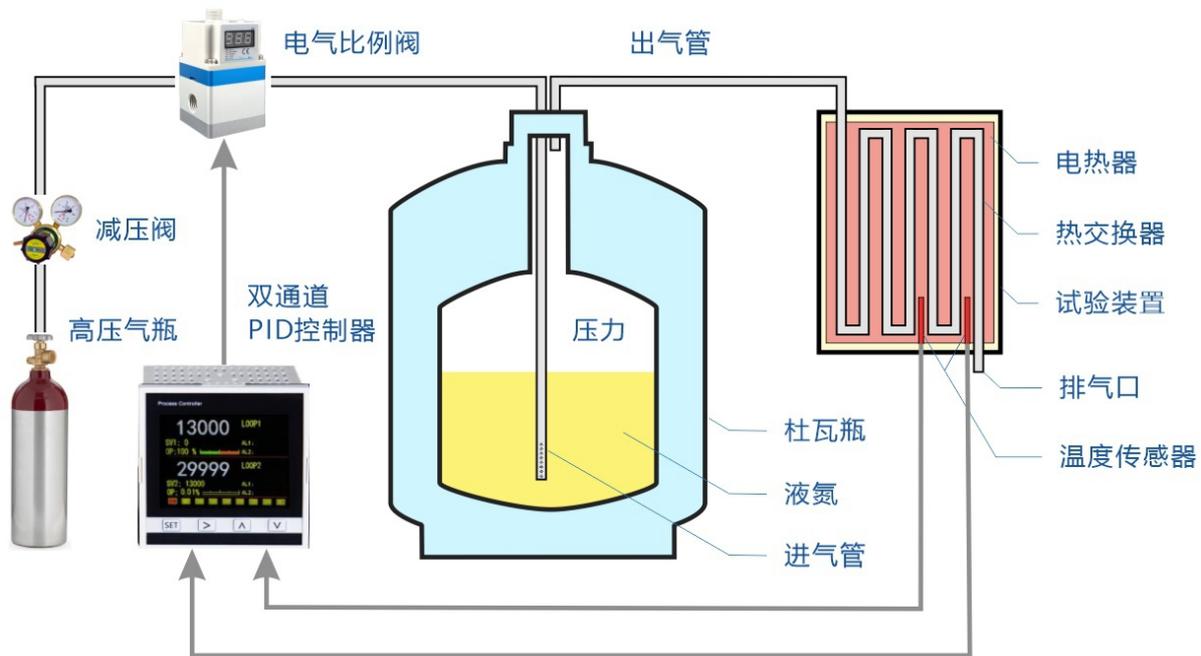


图3 辅助电加热式电气比例阀调节压力的低温冷却试验装置温控系统结构示意图

如图3所示，优化方案是在图2所示方案的基础上增加了电热器，即增加了一路纯加热功能的温度控制。同时，为了配套此加热功能的实现，除增加了一只温度传感器之外，另外还采用了VPC2021-2系列的双通道PID调节器。由此形成了两个独立控制回路，一个回路控制进气压力实现低温温度的粗调，另一回路控制加热实现低温温度的微调，由此同时保证控温速度和精度。

6. 总结

本文提出的解决方案，彻底解决了以往液氮温区低温控制中需要配备昂贵电动低温调节阀的问题，也解决了低温开关阀控温精度很差的问题。

本文所述的三个解决方案，可适用和满足液氮温区内宽量程范围内不同要求的温度控制，在实际应用中可根据具体情况选择使用。其中控制流量和控制压力的方案可适用的温度控制范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim -150^{\circ}\text{C}$ ，而辅助加热器功能后控制压力方案的可控温度范围为 $150^{\circ}\text{C} \sim -150^{\circ}\text{C}$ ，这里的上限温度主要受加热器耐低温特性决定。

上述所有低温控温方案仅适用于液氮气体的吹扫形式，因此温度不是很低，但为更低温度的液氮介质直接流动冷却以及温度控制提供了技术上的借鉴。