

压力敏感涂料静态特性研究中的 温度和气压精密控制解决方案

Precise Control Solution of Temperature and Air Pressure In the Study of Static Characteristics of Pressure-Sensitive Paints

摘要：针对客户提出的在温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 、绝对压力 $1\text{Pa}\sim 600\text{kPa}$ 、氧浓度 $0\sim 80\%$ 范围内实现对压力敏感涂料静态特性校准测试腔室的精密自动控制要求，本文提出了相应的解决方案。解决方案的主要技术内容是采用TEC半导体制冷器进行温度控制、采用动态平衡法和电控针阀进行真空压力控制、采用气体质量流量控制器和混气罐进行氧浓度控制。整个解决方案具有很高的控制精度和易实现性，且无需编程即可进行系统搭建和控制的特点。

1. 项目背景

压力敏感涂料 (Pressure Sensitive Paint: PSP) 表面压力测量技术是二十世纪八十年代后期发展起来的气动力光学测量技术，相比基于离散测压孔的测量技术，PSP作为一种非接触式测压技术，可在远距离获得测量表面的全场压力分布，避免破坏模型及干扰流场，并具有空间分辨率和数据采集率高的特点，在航空航天、汽车制造和叶轮机械等领域具有极广的应用前景，被视为二十一世纪最具发展潜力的风洞试验技术之一。

压敏涂料或涂层的性能评价分为静态和动态以下两种方法：

(1) 静态特性测试：这是指在静止或非常缓慢变化的压力条件下，对压力敏感涂层的性能进行测试。这种测试通常用于评估涂层的灵敏度，即施加压力后涂层的响应程度。静态特性测试还包括测试在不同温度下涂层的灵敏度。

(2) 动态特性测试：这是指在动态或快速变化的压力条件下，对压力敏感涂层的性能进行测试。这种测试通常用于评估涂层的响应速度，即涂层对快速变化压力的响应能力。

最近，有用户提出了压力敏感涂料的静态特性测试需要，要求在静态特性测试仪器上实现真空压力和温度的精确控制，为压敏涂层提供可控的真空压力、氧浓度和温度环境，指标如下：

(1) 对一正方形金属薄板进行单面加热，金属薄板上涂覆有压敏涂层。整个薄板样品放置在一顶部具有光学窗口的密闭腔体内，要求腔体内的真空压力可准确控制。

(2) 样品尺寸： $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 5\text{mm}$ 。

(3) 样品温度： $-10\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，控温精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 真空压力：绝对压力 $1\text{Pa}\sim 600\text{kPa}$ ，精度为读数的 $\pm 1\%$ 。

(5) 氧浓度： $0\sim 80\%$ ，精度为 $\pm 1\%$ 。

本文将针对上述用户提出的技术要求，提出压敏涂层静态特性测试装置的温度、气压和气氛环境精密控制解决方案，为测试装置提供各种温度和可变真空压力的准确控制。

2. 解决方案

从上述技术要求可以看出，压敏涂层静态特性测试所要求的环境控制变量分别为温度、真空压力（正负压）和氧浓度三个变量，而且这三个变量都要求具有可调的不同数值。为此，本解决方案将分别采用以下三种独立的技术实现这三个变量的精确控制：

(1) 温度控制：采用基于帕尔贴原理的TEC半导体制冷技术，这种温控技术是目前比较适合-10~80℃温度范围的加热制冷技术，具有精度高、响应速度快、便于实施和结构简单的特点。

(2) 真空压力控制：采用动态平衡法技术，通过控制进入和排出测试腔体的气体流量，使进气和排气流量达到动态平衡从而实现1Pa~600kPa（绝对压力）宽域范围内任意设定真空压力的准确恒定控制。

(3) 氧浓度控制：采用气体质量流量控制技术，分别控制氧气和其他环境气体的流量，由此来实现混合气体中的氧浓度精密控制。

采用上述三种控制技术所设计的控制系统结构如图1所示。

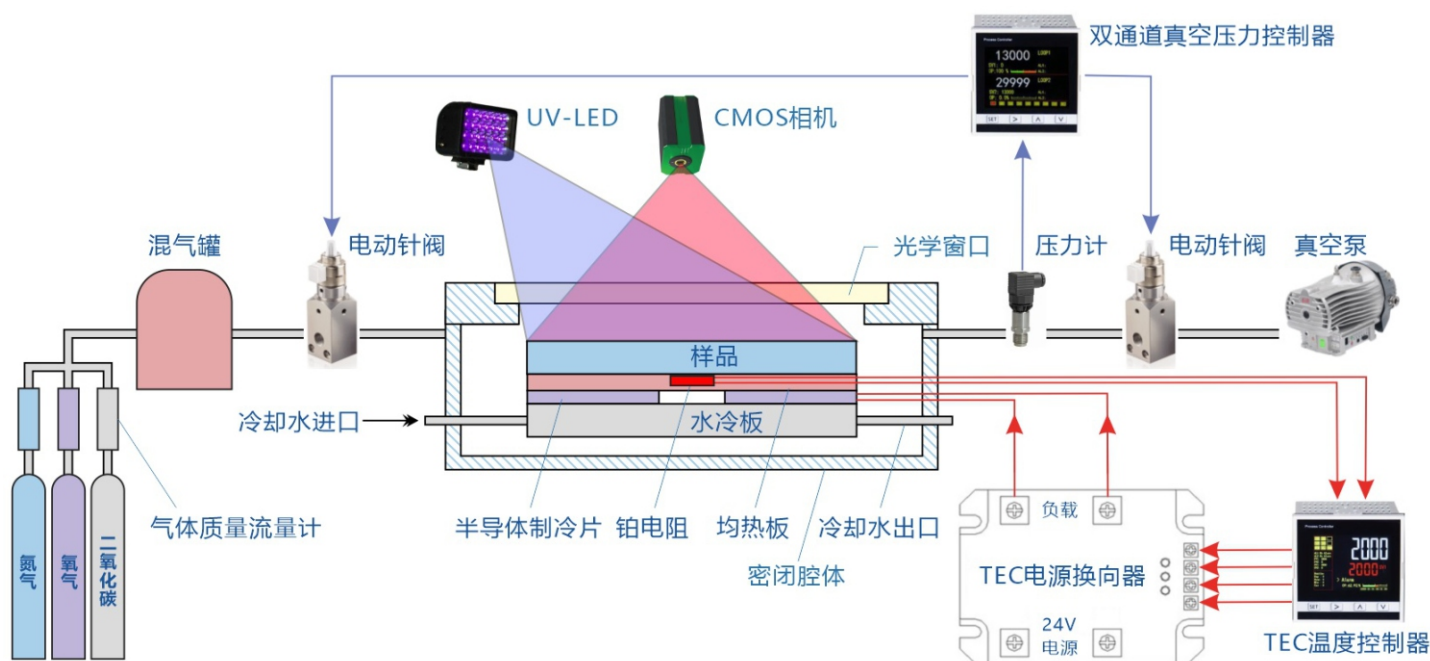


图1 压敏涂料静态特性测试仪器的真空压力温度和氧浓度控制系统结构示意图

如图1所示，压敏涂层的温度控制回路由铂电阻温度传感器、TEC制冷片、TEC电源换向器和TEC温度控制器构成。其中样品的快速加热和冷却采用了TEC半导体制冷片，通过TEC电源换向器改变加载到TEC片上的电流方向来分别进行加热和制冷，由此可实现-10~80℃范围内的快速精确的温度控制。为了保证涂层样品的温度均匀性，在样品和TEC制冷片之间布置了一个紫铜板，紫铜板内还镶嵌了一只铂电阻温度传感器以用来测量和控制样品温度。为了在真空环境内给TEC制冷片提供很好的散热能力，图1中设计了水冷板冷却方式，外部循环冷却水进入校准用的密闭腔体对水冷板提供冷却。压敏涂料样品的温度程序控制采用了VPC2021-2型号的TEC温度控制器，此控制器具有加热和制冷双向控制功能，具有程序控制功能，可根据设置的一些列温度点和升降温速率进行程序控制。此控制器自带计算机软件，可通过上位机进行远程设置和操作。

如图1所示，真空压力控制回路由进气电动针阀、真空压力传感器、排气电动针阀、双通道真空压力控制器和真空泵组成。其中真空压力传感器由一些列不同量程的薄膜电容真空计和正压压力传感器构成（图1中并未全部汇出），以满足不同量程范围内的真空压力准确测量，一般的配备是0.1、10、1000Torr三只不同量程的电容真空计和一只硅压阻式压力计，这些真空计和压力计都可以很轻松的达到0.5%的测量精度。真空压力计所采集的气压信号传输给真空压力控制器，控制器根据设定值与测量信号比较后，经PID算法计算后输出控制信号驱动电动针阀来改变进气或排气流量，由此来实现校准腔室内气压的精密控制。

这里需要说明的是，在动态平衡法真空压力控制过程中，对于绝对压力在1kPa~600kPa范围的较高气压区间，需要采用下游控制模式才能获得较高的控制精度，即固定进气电控针阀的开度保持进气流量恒定，通过快速自动调节下游排气电控针阀的开度来进行真空压力控制。对于绝对压力在1kPa以下的低压高真空区间，则需要采用上游控制模式才能实现较高精度的控制，即完全打开排气电控针阀，使真空泵全速抽取校准腔室内的气体，通过快速自动调节上游进气电控针阀的开度来进行真空度控制。

为了实现两只电控针阀的单独调节，解决方案中配备了VPC2021-2系列的双通道真空压力控制器，两个独立的控制通道可分别用来进行上游和下游控制模式的运行，并进行独立的PID自动控制或手动控制。此控制器同样自带计算机软件，可通过上位机进行远程设置和操作。

对于氧浓度的控制，如图1所示，采用了多个气体质量流量控制器来对进气进行精密的流量调节，以精确控制氧气浓度或氧气所占比例。通过精密测量后的多种工作气体在混气罐内进行混合，然后再进入校准腔室，由此可以准确控制校准腔室内的氧分压。在氧浓度控制过程中，还特别需要注意以下两点：

(1) 对于某一种单独的工作气体，需要配备相应气体的气体质量流量控制器。

(2) 混气罐压力要进行恒定控制或在混气罐的出口处增加一个减压阀，以保持混气罐的出口压力稳定，这对准确控制校准腔室内的真空压力非常重要。

3. 总结

综上所述，本解决方案可以很好的实现用户提出的各项技术要求指标，并具有很高的控制精度和自动控制能力。另外，此解决方案还具有以下特点：

(1) 本解决方案具有很强的适用性，通过改变其中的相关部件参数指标就可适用于不同控制范围的压敏涂料静态特性测试需要。

(2) 解决方案中所采用的温度和真空压力控制器自带计算机软件，可直接通过计算机的屏幕操作进行整个控制系统的调试和运行，且控制过程中的各种过程参数变化曲线自动存储，这样就无需再进行任何的控制软件编写即可很快搭建起温度和真空压力控制系统，极大方便了压敏涂料静态特性的校准。