

低气压环境聚酰亚胺材料沿面闪络特性 测试系统真空度控制技改方案

Solution of Vacuum Control for Testing System of Surface Flashover Characteristics of Kapton in low pressure environment

摘要：针对现有低气压环境下沿面闪络测试中存在真空度无法精确控制所带来的一系列问题，特别是针对用户提出的对现有沿面闪络试验装置的真空控制系统进行技术改造要求，本文提出了相应的技改方案，技改方案采用基于动态平衡法的电动针阀和电动球阀上下游控制模式，并辅助上游微小进气流量的自动可变泄漏阀控制技术，可在超高真空至常压的全真空度范围内实现低气压环境的精密控制和准确模拟，可有效提高沿面闪络性能测试精度。

1. 项目背景

沿面闪络是指在绝缘材料与空气、真空等介质交界面处形成的贯穿性击穿放电现象。由于沿面闪络的放电电压远小于绝缘材料的击穿放电电压，因此沿面闪络成为空间环境中航天器表面静电放电的主要形式之一，对航天器安全有着严重的威胁，因此对其研究和测试十分重视。

国内外在绝缘材料沿面闪络特性方面进行了广泛的研究，特别是针对航天器所处太空环境的复杂性，我国也建立了航天器表面带电模拟系统，并以航天器常用绝缘材料——聚酰亚胺为典型研究对象，研究低气压环境下聚酰亚胺以及其他新材料的沿面闪络特性，为航天器静电防护设计提供依据。但已建立的低气压环境沿面闪络试验装置存在无法高精度控制真空度的问题，由此会给沿面闪络测量带来较大误差，同时也会造成对解吸附气体、粗糙度、化学变化等影响因素的研究产生严重影响，更不利于新材料研发过程中的沿面闪络性能及其相关因素的准确评价。

针对现有沿面闪络试验装置存在的问题，用户提出要对试验装置的真空控制系统进行技术改造。为此，本文根据用户的技术要求提出了技改方案，以在全真空度范围内实现低气压环境的准确模拟，有效提高沿面闪络性能测试精度。

2. 解决方案

基于现有低气压环境沿面闪络试验装置，解决方案拟达到如下技术指标：

(1) 气压控制范围（绝对压力）： $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

(2) $1 \times 10^{-1} \text{Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{Pa}$ 范围控制精度：读数的 $\pm 1\%$ 。

(3) $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 范围控制精度：读数的 $\pm 20\%$ 。

(4) 功能：在气压控制范围内可设置任一值进行自动恒定控制，控制装置带通讯接口可与上位机通讯。

为了实现从低真空至超高真空的全量程真空度准确控制，解决方案将采用动态平衡法进行控制，其具体控制内容如下：

(1) 对于 $1 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的低真空范围，采用下游控制模式，即固定真空腔体进气流量，通过调节下游排气流量来实现真空度的准确控制。

(2) 对于 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \sim 1 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的高真空范围，采用上游控制模式，即固定（或最大）真空腔体排气流量，通过调节上游进气流量来实现真空度的准确控制。

依据上述控制方法设计的真空度控制系统如图1所示。

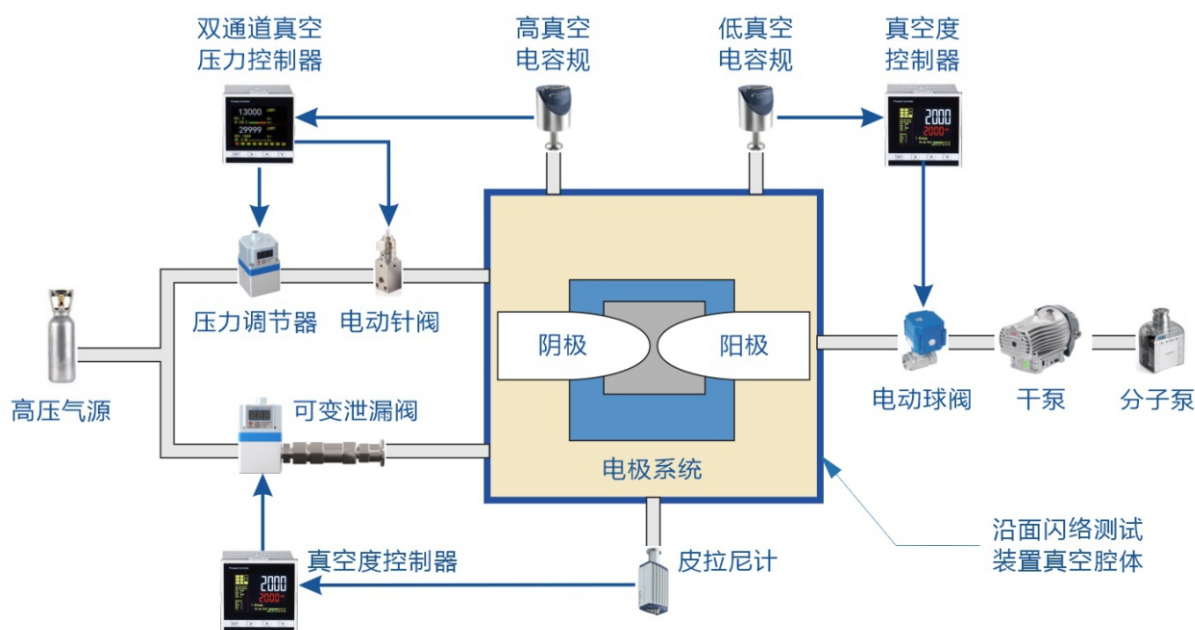


图1 沿面闪络试验装置真空度控制系统结构示意图

如图1所示，整个真空度控制系统主要由以下三部分组成：

(1) 下游排气流量调节装置：如图1右边所示，下游排气流量调节装置主要由低真空电容规、电动球阀、VPC2021-1系列单通道真空度控制器、干泵和分子泵组成。其中干泵用来提供低真空源，分子泵用来提供高真空源，低真空电容规真空度测量量程为 $1 \times 10^3 \text{ Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，电容规测量得到的真空度信号传输给真空度控制器，控制器将检测信号与设定值比较后再经PID计算输出控制信号驱动电动球阀的开度变化，由此来调节排气流量使沿面闪络测试装置真空腔体内的真空度快速恒定在设定值处。

(2) 上游进气流量粗调装置：如图1左上角所示，上游进气流量粗调装置主要由高真空电容规、电动针阀、压力调节器、双通道真空度控制器和高压气源组成。高真空电容规真空度测量量程为 $1 \times 10^1 \text{ Pa} \sim 1 \times 10^3 \text{ Pa}$ ，电容规测量得到的真空度信号传输给真空度控制器，控制器将检测信号与设定值比较后再经PID计算输出控制信号驱动电动针阀的开度变化，由此来调节进气流量使沿面闪络测试装置真空腔体内的真空度快速恒定在设定值处。为了保证电动针阀进气口处的压力稳定且略高于一个大气压，在电动针阀的进气口处安装了一个压力调节器，以对高压气源进行降压和精密恒压控制，由此可有效保证高真空度控制精度。粗调装置采用了VPC2021-2系列双通道真空度控制器，其中第一通道用来连接高真空计和电动针阀组成闭环控制回路，第二通道则直接用来控制压力调节器。

(3) 上游进气流量细调装置：如图1左下角所示，上游进气流量细调装置主要由用于超高真空测量的皮拉尼计或电离规、可变泄漏阀、VPC2021-1系列单通道真空度控制器和高压气源组成。皮拉尼计或电离规真空度测量量程为 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \sim 1 \times 10^1 \text{Pa}$ ，电离规测量得到的真空度信号传输给真空度控制器，控制器将检测信号与设定值比较后再经PID计算输出控制信号驱动可变泄漏阀，由此来调节微小进气流量使沿面闪络测试装置真空腔体内的真空度快速恒定在设定值处。需要注意的是，在进气流量细调过程中，需要将粗调装置中的电动针阀关闭，使得粗调管路内无任何进气。

在整个真空度量程范围的控制过程中，具体操作步骤需要注意以下内容：

(1) 对于 $1 \times 10^3 \text{Pa} \sim 1 \times 10^5 \text{Pa}$ 的低真空范围，采用下游控制模式。在下游控制运行之前要关闭上游进气细调装置和开启上游进气粗调装置，并设置上游进气粗调装置为手动模式，使电动针阀的开度保持恒定，即使得进气流量保持恒定，然后再运行下游控制模式。

(2) 对于 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \sim 1 \times 10^3 \text{Pa}$ 的高真空范围，采用上游控制模式。在上游控制运行之前要设置下游进气粗调装置为手动模式，并使控制器输出值（OP）为100%，使电动球阀的开度保持全开状态，即使得排气流量为最大状态，然后再运行上游控制模式。

3. 总结

综上所述，本解决方案可以彻底解决低气压环境沿面闪络特性测试过程中的真空度控制问题，并具有很高的控制精度和自动控制能力。此外，本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和可拓展性，通过改变其中的相关部件参数指标就可适用于不同范围的真空压力，实现各级真空度的精密控制。

(2) 本解决方案可以通过高压气源的改变来实现不同工作气体下的真空度控制，也可进行多种气体混合后的低气压环境控制，具有很大的灵活性。

(3) 解决方案中的所有型号控制器都自带计算机软件，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控制系统，极大方便了试验装置的搭建和测试研究。