

血液透析滤芯气密检测装置中的精密压力控制解决方案

Precise Pressure Control Solution in Airtight Detection Device of Hemodialysis Filter Element

摘要：针对目前血液过滤芯气密性检测过程中存在的自动化水平较低、多个检测压力之间需人工切换和压力控制精度较差的问题，为满足客户对高精度和自动化气密性检测的要求，本文提出了相应的解决方案。解决方案的主要特点是全过程的可编程压力控制，可针对多个压力设定点可进行任意编程设定和切换，压力控制可达到 $\pm 0.5\%$ 的精度，既能实现全过程的自动化，又能满足精密压力控制要求。

1. 问题的提出

血液透析 (Hemodialysis) 是血液净化技术的一种，是将引出的患者血液经一个由无数根空心纤维组成的过滤芯，血液与透析液在过滤芯内进行物质交换清除体内的代谢废物、维持电解质和酸碱平衡。血液透析过滤芯需经严格的气密性检测，否则会造成非常严重的医疗事故的。

为了完整模拟血液透析的应用环境，血液透析过滤芯的气密性检测采用压差法，而且测过程需要在多个压力下进行，在每个压力检测过程包含充气、保压、检测、排气四个阶段，指标都通过的为合格产品。在目前的血液透析滤芯的气密性检测设备中，普遍存在以下几方面的问题：

- (1) 气密性检测过程中的多个压力切换完全靠人工手动调节减压阀，自动化水平较低。
- (2) 减压阀式的压力调试使得压力调节准确性较低，并且压力波动较大，需要进行多次复检，整个检测过程需要耗费大量工时，检测效率低下。

针对目前血液过滤芯气密性检测过程中存在的上述问题，以及客户对高精度和自动化气密性检测的要求，本文提出了相应的解决方案。解决方案的主要特点是全过程的可编程压力控制，可针对多个压力设定点可进行任意编程设定和切换，压力控制可达到 $\pm 0.5\%$ 的精度，既能实现全过程的自动化，又能满足精密压力控制要求。

2. 血液透析滤芯气密性检测原理

血液透析过滤芯是一种具有进口和出口形式的密闭行组件，因此为模拟滤芯的实际应用环境，其气密性测试方法首选是压力衰减法中的压差法。

压力衰减泄漏测试是当今最常用的方法。它的简单性使其易于自动化并集成到生产/装配过程中。压力衰减法测量原理如图1所示，是使用空气填充被检部件直到达到目标压力，切断空气源以隔离压力，并测量该压力在设定时间段内的衰减（损失），任何压力损失都表明存在泄漏。压力衰减法的灵敏度是测试部件尺寸和测试时间的函数。大多数测试都可以相当快速地执行，并获得高度准确的结果，但零件越大，获得准确测试结果所需的周期时间就越长。

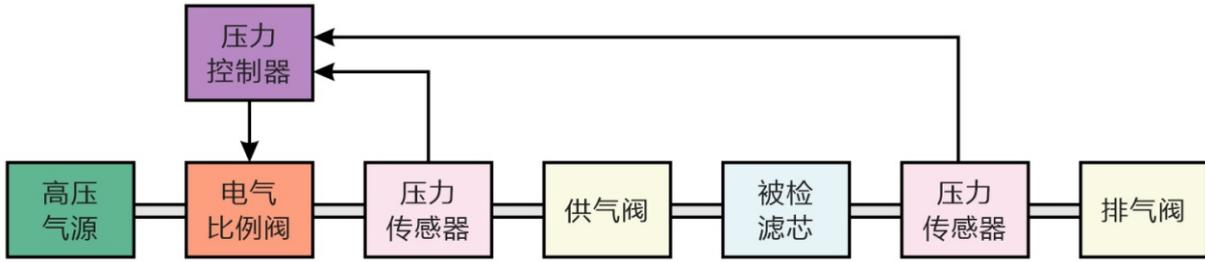


图1 血液透析滤芯气密性测量原理框图

如图1所示，血液透析滤芯气密性测量原理是高压气体经电气比例阀和供气阀加载到被检滤芯进气口，加载到被检滤芯进气口的恒定压力由压力控制器通过电气比例阀提供，被检滤芯的泄漏气体从排气阀排出。在供气阀打开和排气阀关闭时进行充气测试，供气阀和排气阀都关闭时进行保压气密性测试，测试完成后供气阀关闭和排气阀打开时进行排气。整个检测过程中压力随时间的变化曲线如图2所示。

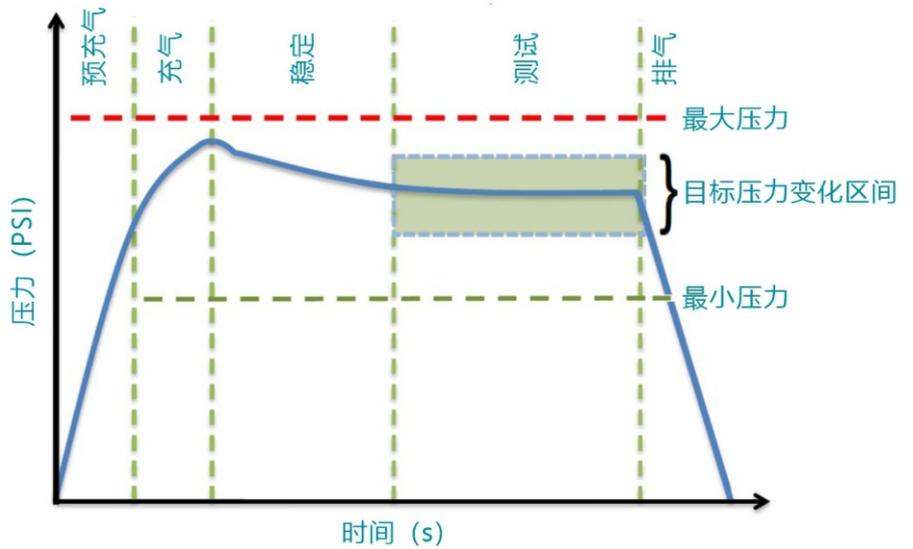


图2 气密性测量过程中的压力变化曲线

3. 解决方案

针对血液透析过滤芯气密性的自动化和高精度测试要求，基于上述压力衰减法测试原理，我们提出的气密性检测系统方案如图3所示。



图3 血液过滤芯气密性检测系统结构示意图

对于如图3所示的检测系统，其滤芯气密性检测过程如下：

(1) 首先将血液透析滤芯安装在检测系统中，并接通高压气源和对系统供电，保持供气阀和排气阀处于关闭状态。

(2) 通过压力控制器的计算机控制软件或按键操作，对检测压力进行设置。若进行多个压力下的气密性测试，压力控制程序设置应从小到大进行编程。

(3) 打开供气阀，向血液透析滤芯供气，进行充气并按照上述压力设定值进行控制。

(4) 压力稳定后（约几秒钟），关闭供气阀03，进行气密性测试。

(5) 完成某个压力设定点下的测试后，按照设定程序自动进行下一个压力设定点下的充气、恒压和气密性测试，直至完成血液透析滤芯的多段编程压力测试。

(6) 完成所有压力下的测试后，打开排气阀04，对滤芯进行排气，断气断电后拆下滤芯。

从上述描述可以看出，此滤芯气密性检测系统具有以下特点：

(1) 采用了串级控制形式，用压力控制器、电气比例阀和压力传感器组成串级控制的主回路，电气比例阀作为辅助回路，由此可实现任意设定压力下的自动PID控制。

(2) 压力控制器为可编程PID控制器，可进行多个压力点下的自动程序控制，也可设计和存储多个气密性检测控制程序，程序设计可通过随机的计算机软件进行方便操作。同时还可设置和存储多组PID参数，PID参数可通过自整定获得，避免了人工调试的繁琐。

(3) 压力控制器可选配双通道系列的PID控制器，可实现同时一路控制压力和另一路测量漏气压力。

(4) 压力控制器为超高精度PID控制器，具有24位AD、16位DA和0.01%的最小输出百分比。控制器体积小，尺寸为96mm×96mm×87mm。随机配备的计算机软件可进行编程、运行控制、过程参数显示、过程曲线显示和存储，以后进行后续的检测数据处理和调用。

(5) 压力控制器具有远程设定功能，可外接调节旋钮进行手动压力数字设定，便于多种控制方式的选择。

4. 总结

综上所述，本文所述的解决方案彻底解决了目前血液过滤芯气密性检测过程中存在的自动化水平较低、多个检测压力之间需人工切换和压力控制精度较差的问题，满足了客户对高精度和自动化气密性检测的要求。

此解决方案的主要特点是全过程的可编程压力控制，可针对多个压力设定点可进行任意编程设定和切换，压力控制可达±0.5%的精度，既实现了全自动检测，又能满足精密压力控制要求。

此解决方案具有很大的灵活性和可拓展性，可改动和应用到所有真空压力衰减法气密性检测设备中高精度的真空度和压力控制，还可同时实现高精度的温度控制。