

聚变堆材料氦气扩散系数测试 系统设计与实现

王正飞¹, 钱夏夷², 黄彦³, 俞健³

(1. 南京工业大学自动化与电气工程学院, 江苏南京 210009; 2. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏南京 210005; 3. 南京工业大学化学化工学院, 江苏南京 210009)

摘要:针对研制出的复合材料是否符合应用于核聚变反应堆实验的要求, 设计了基于 LabVIEW 的自动测试系统。通过模糊控制算法调节气体流量, 测试出氦气在反应堆用材料中的扩散系数来评价该材料的性能, 以选择更优的材料应用于聚变反应堆中, 避免反应器的性能下降, 测试时可以对测试进程进行远程监控。介绍了测试系统的结构和测试原理、测控系统框架和软件流程, 详述了模糊控制算法如何应用于该系统。实验结果表明, 所设计的测试系统能比较准确地测出石墨基体上带涂层的样品的扩散系数。

关键词:核聚变反应堆; 模糊控制; 扩散系数; 测试系统; LabVIEW

中图分类号: TP274+.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)06-0133-04

Design and implementation of test system for helium diffusion coefficient of material applied in fusion reactor

WANG Zheng-fei¹, QIAN Xia-yi², HUANG Yan³, YU Jian³

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;
2. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210005, China;
3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: In order to test the application of the newly developed material in fusion reactor experiment, a test system is designed based on LabVIEW. The performance of this newly developed material can be evaluated through testing the helium diffusion coefficient with fuzzy control algorithm, which is useful to employ the optimal material in the fusion reactor and avoid performance penalties of the fusion reactor. This test process can be remotely monitored during the test. Test system, principle, hardware frameworks and software processes are introduced. The application of fuzzy control algorithm in the test system is focused on. The result shows that the test system can almost accurately measure the helium diffusion coefficient of the coated graphite substrate.

Key words: fusion reactor; fuzzy control; diffusion coefficient; test system; LabVIEW

核聚变反应堆由于其燃料来源充足, 放射性废物更少, 受到了关注。由于具有耐高温强度、低活性和高断裂韧性, 炭炭和碳化硅复合材料适用于聚变反应堆中的第一壁材料^[1]。在聚变反应堆中如果氦气渗透过材料进入等离子体中, 聚变燃料将会被稀释, 辐射的损耗会使等离子体的温度降低, 这将严重影响反应器的性能^[2]。扩散是指氦气分子在浓度梯度作用下从高浓度区通过各种介质向低浓度区自由迁移达到平衡的一种物理过程, 氦气扩散系数的高低是聚变反应堆用材料优劣的主要指标之一, 对材料(第一壁石墨)的要求是其氦气扩散系数尽量低。本文中设计了一套全自动测试系统来测试材料中的氦气扩散系数以评估聚变堆用材料的性能, 同时设计了一套监测软件供局域网内的多名客户实时观测测试进程。

1 系统结构和原理

聚变堆用材料氦气扩散系数测试系统主要包括质量流量控制器、真空规、数据采集卡、样品测试池、待测样品、真空泵、氦气检漏仪、计算机、各部件电磁阀及管线。真空泵选用英国爱德华(Edwards)公司的 RV 系列油封旋片泵, 其中样品测试池的低真空侧压力测量选用 Edwards APG100 真空规, 高真空室压力测量选用 Edwards WRG 宽量程真空规, 样品测试池中高、低真空侧被样品隔开, 同时通过测试池控制阀控制测试池通断, 真空规与高真空室相连的分别是氦气检漏仪以及真空泵。氦气检漏仪选用德国普发公司的 Adixen ASM 142, 通过 RS232 串口控制氦气检漏仪并读取氦气透过量。质量流量控制器选用七星华创 CS200, 通过 RS232 串口控制和读取气

体流量。

氦气在聚变堆中被作为冷却剂,因此测试气体选用氦气。为了更准确地测定测试结果,测试前需要对系统抽真空;待高真空侧压力值下降至 500 Pa 以内后关闭真空泵控制阀、真空泵,打开氦气检漏仪,此时氦气检漏仪的分子泵开始工作,打开气源控制阀、流量控制阀,系统自动调节质量流量控制器使低真空侧保持在压力设定值,自动记录当前压力设定值对应的各个参数,结束当前循环并且开始下一轮,直至进入最后一个压力设定值对应的测试循环。当低真空侧压力恒定时,氦气流入测试池低真空侧的速度与氦气透过材料的速度相同,系统处于稳定状态,此时记录氦气检漏仪的值,即氦气透过量。氦气对样品的扩散系数 K 可用式(1)表示:

$$K = dC/P_H A \quad (1)$$

式中, P_H 为低真空侧压力, Pa; A 为复合材料的面积, cm^2 ; d 为复合材料的厚度, cm; C 为氦气从低真空侧透过样品进入高真空侧的单位时间的量, 即氦气透过量, $\text{Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ 。

2 测控系统框架结构

为了节约开发周期并提高效率,软件采用 LabVIEW。整个测试系统设计框图如图 1 所示,其中数据采集卡采用阿尔泰多功能数据采集卡 USB2831,主要参数为 12 位 AD 精度,250 KS/s 采样频率,16 K FIFO,输入电压范围为 0 ~ 10 V,输出电压为 0 ~ 5 V。测试过程需要记录系统稳定后各参数的值,测试过程中各电磁阀的状态都是保持不变的。

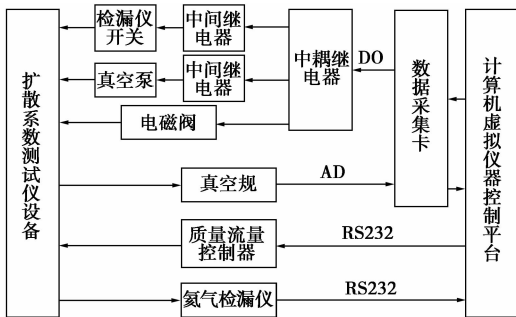


图 1 系统设计框图

3 软件设计

测试系统软件部分通过 LabVIEW 进行开发。系统控制流程图如图 2 所示,依据模块划分,该应用程序可分为 5 个进程,分别是用户登录、模式选择、

参数设置、仪器控制、生成报表并保存。在自动测试之前需要用户进行参数设置,利用生产者-消费者循环,通过队列的传输,在用户操作之前设置相关的参数,然后开始测试。同时本系统专门设计了独立的监测软件供客户使用,监测软件采用 DataSocket 技术来实现主机与多个客户端之间数据的共享,网络通信系统包括发布者、服务器及接收者等 3 部分,首先扩散系数测试系统在测试过程中通过调节电磁阀和流量控制器控制测试进程,将各个重要参数通过编程发送到 DataSocket 服务器,客户端从 DataSocket 服务器中接收数据,各客户端接收数据的过程各自独立^[3]。

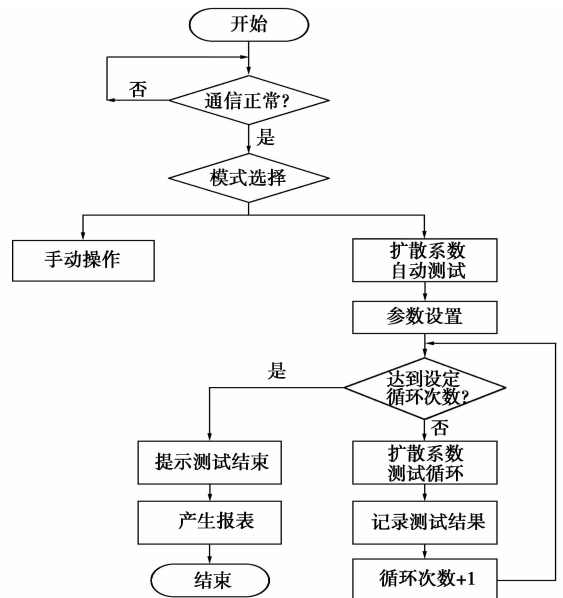


图 2 系统控制流程图

3.1 测试前准备

本系统通信方式分为 2 种,一种是真空规采集到的压力转换为模拟电压,模拟电压通过数据采集卡传输到电脑中的是 AD 原始数据 LSB 编码,在 LabVIEW 中将 LSB 编码转换成电压值,再通过公式将电压值转换为所对应的气体压力值。另一种采集通信方式是电脑和质量流量控制器、氦气检漏仪等之间采用串口通信协议,通讯设置为 8 位数据位、1 位停止位、无奇偶校验位,波特率为 19 200 bit/s。首先通过 VISA 配置串口,然后将读指令写入缓冲区内,通过 VISA 读取模块读出对应的字符串,提取出字符串数据的有效位,最终经过转换得到结果^[4]。

用户首先进入测试界面,程序界面如图 3 所示。软件会自动搜索串口,判断通信是否正常,如果正常

即可进入测试准备阶段等待用户进行下一步操作。当用户选择手动测试后即可通过软件手动控制阀门开关调节质量流量控制器;当用户选择自动测试后首先设定参数,然后进行自动测试。

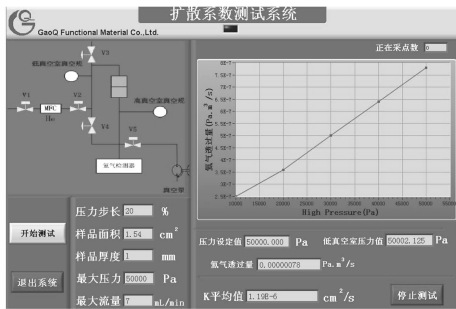


图3 程序界面

扩散系数测试分为全自动测试和手动测试。用户选择手动测试后可以控制各个电磁阀的开关和质量流量控制器的流量。当选择自动测试后首先设置参数,系统将根据压力步长和最大压力自动分配压力设定值^[5]。

3.2 基于模糊控制的自动测试阶段

当用户选择开始测试后,用户可以通过界面左上方的流程图直观地看到系统内各部件实时开闭状态,左下方的各参数为用户测试前设置的参数,右下侧的参数为氦气透过量、低真空室压力的瞬时值。进入自动测试阶段时,系统通过模糊控制算法自动控制质量流量控制器调节进气流量使低真空室的压力稳定在每一个步长对应的压力设定值,直到最后一个步长的循环结束^[6]。

3.2.1 模糊控制器的结构选择

模糊控制器的结构选择确定了模糊控制器的输入输出变量,对整个系统的性能有很大的影响。

二维模糊控制器的输入变量有2个,输出有1个。其模糊规则一般形式为:

$$R_i: \text{if } X_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } X_2 \text{ is } A_2^i, \text{ then } Y \text{ is } B^i$$

以上2个输入变量、1个输出均为论域上的模糊子集。其模糊关系如下:

$$R(x, y) = X_1 \bigcup_{i=1}^n (A_1^i \times A_2^i) \times B^i \quad (2)$$

一般对于实际控制系统, X_1 取为控制误差, X_2 取为误差的变化率。由于既考虑了误差,又考虑了误差变化的影响,因此测试性能优于一维模糊控制器。又由于多维模糊控制器维数过多,模糊规则不易确定,控制算法过于复杂,因此本系统使用了二维模糊控制系统。

3.2.2 模糊化和模糊规则的确定

设压力的给定值为 P_s , 检测到的实时压力值为

P , 则误差 $e = P - P_s$, 基本论域为 $[-10, +10]$, 论域 $X = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$, 则误差 e 的量化因子为 $K_e = 3/10 = 0.3$ 。论域上的模糊子集对应的语言值分别表示当前压力值相对于给定值来说的情况:“极低”、“很低”、“偏低”、“正好”、“偏高”、“很高”、“极高”。

设测量前后两次压力值误差 e_1, e_2 的时间为 t_1, t_2 , 误差变化率 $ec = (e_2 - e_1)/(t_2 - t_1)$, 基本论域为 $[-1, +1]$, 论域 $Y = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$, 则误差变化率 ec 的量化因子为 $K_{ec} = 3/1 = 3$ 。相应的语言值分别代表的误差变化的趋势:“快速减小”、“减小”、“缓慢减小”、“不变”、“缓慢增大”、“增大”、“快速增大”。

系统输出,即控制质量流量控制器的电压 u , 基本论域为 $[-5, 5]$, 论域 $Z = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$, 则输出控制电压 u 的量化因子为 $K_u = 3/5 = 0.6$ 。相应的语言值分别代表“快速排气”、“排气”、“缓慢排气”、“无动作”、“缓慢进气”、“进气”、“快速进气”。由于质量流量控制器没有排气功能,只能利用系统的样品自行将多余的气体排出,因此当输出控制电压为负时,质量流量控制器默认为无动作。

本次设置的隶属度函数为 Triangle 和 Sigmoid, 解模糊方法为重心法。根据以往的控制经验,再结合经典的系统输出相应的动态过程图确定了模糊控制规则表,如表1所示。

表1 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	NS
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

在 LabVIEW 中实现模糊控制有多种方法,比如执行时调用 CIN 节点连接编译的 C 语言代码,还有利用 Matlab Script 节点编辑和调用编译好的 Matlab 程序,本系统利用了 Fuzzy Logic Toolkit 来实现。所有参数均设置完后,LabVIEW 提供的三维模糊规则测试系统如图4所示。假设偏差 $E = -1.5$, 偏差变

化率 $EC = -0.5$, 则相应的输出 $U = 2.56$ 。

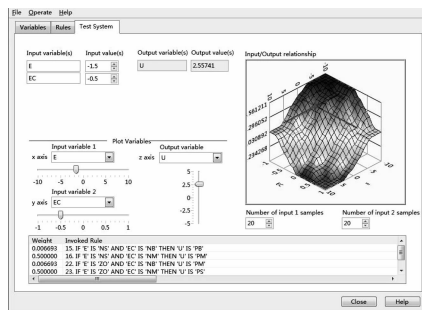


图 4 三维模糊规则测试系统

4 测试结果与分析

对石墨基体以及石墨基体上带某种涂层的样品分别进行实验,这 2 种样品均是面积为 1.54 cm^2 的圆片,厚度为 0.1 cm ,压力步长设为 20% ,最大压力值为 $50\,000 \text{ Pa}$,则系统会自动对 5 个压力设定值点进行测试,分别为 $10\,000$ 、 $20\,000$ 、 $30\,000$ 、 $40\,000$ 、 $50\,000 \text{ Pa}$,得到的实验结果如表 2、表 3 所示。

表 2 实验数据 1

序号	压力设定值/ Pa	氦气透过量/ ($\text{Pa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	氦气扩散系数/ ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
1	10000	1293.6	0.84×10^{-2}
2	20000	3418.8	1.11×10^{-2}
3	30000	6468	1.40×10^{-2}
4	40000	11026.4	1.79×10^{-2}
5	50000	15554	2.02×10^{-2}

表 3 实验数据 2

序号	压力设定值/ Pa	氦气透过量/ ($\text{Pa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	氦气扩散系数/ ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
1	10000	0.25	1.62×10^{-6}
2	20000	0.36	1.18×10^{-6}
3	30000	0.49	1.08×10^{-6}
4	40000	0.64	1.04×10^{-6}
5	50000	0.78	1.02×10^{-6}

由表 2、表 3 可见,各个压力设定值下的透过量基本呈线性关系。石墨基体扩散系数为 $1.43 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$,石墨基体上带某种涂层的样品扩散系数为 $1.19 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。由数据可以看出相同压力设定值下的石墨基体带涂层的样品氦气透过量和氦气扩散系数均远远小于石墨基体样品,氦气扩散系数越小,说明该样品越致密,其在聚变堆中的作用也越好。

5 结论

该系统经过设计和调试,能够同时实现手动测试和自动测试,相对于手动测试而言,自动测试通过模糊控制算法快速调节系统至稳定阶段并记录各个阶段的参数值,有效地节省了时间,网络通信功能则方便用户远程监控测试进程,节省了精力。经过长时间不间断地测试,可以发现该系统界面友好,自动化程度高,运行状况良好,安全稳定。同时测试数据齐全并且可靠,便于日后方便地对数据进行调用分析,大大提高了合作单位对聚变反应堆中所需要材料的氦气扩散系数进行测试、分析的效率。

参考文献

- [1] 王述钢,蒋驰.核聚变反应堆用功能涂层制备技术发展现状[J].热喷涂技术,2012,4(1):1-4.
- [2] Kazuoki Toyoshima,Tomoaki Hino,Yuko Hirohata, et al. Crack propagation analysis of SiC_f/SiC composites by gas permeability measurement [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31: 1141-1144.
- [3] Liu B L, Yuan Minghai, Chen Guorong, et al. Research on the internet of things network experiment system based on virtual instrument technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 427/428/429:2804-2807.
- [4] 谢冰,陈昌鑫,郑宾.基于 LabVIEW 的数据采集与信号处理系统设计[J].现代电子技术,2011,(14):173-175.
- [5] 张永胜,高宏力,刘庆杰.基于 LabVIEW 的模糊控制系统设计[J].仪表技术与传感器,2012,(3):27-29.
- [6] 冯梅琳,周贤娟,余建国.基于 LabVIEW 的层压机模糊 PID 温度测控系统研究[J].仪表技术与传感器,2013,(11):78-81. ■

叶氏化工主要成员企业谦信化工荣获“十佳助剂溶剂品牌”

全球最大醋酸酯类溶剂生产商、中国最大油墨生产商及“叶氏化工集团有限公司”(“叶氏化工”或“集团”)主要成员企业——江门谦信化工发展有限公司(简称“谦信化工”)2014年6月3日宣布:谦信化工2014年再次荣获慧聪网“2013年度第十届中国涂料原料及设备十佳品牌评选”活动“十佳助剂溶剂品牌”。溶剂是叶氏化

工最大的核心业务。谦信化工作为全球最大的醋酸酯类溶剂生产商,是叶氏化工瞄准了中国改革开放的发展机会,集团旗下子公司谦信化工发展有限公司于1993年与江门市启盛化工发展有限公司成为合作伙伴,凭借中外合资的优势,互相取长补短,联手打造了20载的辉煌成绩。(王莉)