

中国矿业大学教材建设工程资助教材

能源动力类专业 开放实验

主 编 韩东太
副主编 晁 阳 王利军
何光艳 高云鹏
任燕燕

NENGYUAN DONGLILEI ZHUANYE Kaifang Shiyao

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

设工程资助教材

能源动力类专业开放实验

主 编 韩东太

副主编 晁 阳 王利军 何光艳

高云鹏 任燕燕

主 审 郭楚文



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书为普通高等教育能源与动力工程类本科专业开放实验教材。本书归纳总结了能源动力类专业实验课程的内容,包括量热与热物性测定实验、热工控制实验、新能源综合利用实验、毛细管辐射空调实验、火电厂虚拟仿真实验、流动与传热虚拟仿真实验等六章。本书在编写过程中,注重体现学科融合和知识内容的先进性,除介绍专业课程知识和应用外,还着重论及其他学科与本学科的联系,把最新的科研成果、工程理论和技术吸收进来。本书以综合性、研究性实验内容为主,突出创新性和开放性,既符合工程热力学、传热学、工程流体力学等专业课的实验教学需求,也能满足能源与动力工程综合实践、创新创业教育的实践教学需要。

本书可作为能源动力类本科专业独立实验教材,满足“卓越工程师教育培养计划”实验与实践教学需求,或者作为本科生及研究生自主创新实验活动的实验指导书,也可供从事能源与动力工程行业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

能源动力类专业开放实验 / 韩东太主编. —徐州 :

中国矿业大学出版社, 2016. 6 .

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3154 - 3

I. ①能… II. ①韩… III. ①能源—高等学校—教材

②动力工程—高等学校—教材 IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146659 号

书 名 能源动力类专业开放实验

主 编 韩东太

责任编辑 褚建萍

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 17.5 字数 335 千字

版次印次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

实验教学与实践教育是普通高等教育的重要环节,它不但可以巩固和加深学生对理论知识的理解,更重要的是通过有目的、有计划的实践教学,提高学生的动手能力、创新思维能力,培养学生的工程实践技能和科学素质。

本书根据教育部“卓越工程师教育培养计划”,主要针对于本科院校能源动力类专业编写。本书在编写过程中,始终贯彻理论联系实际、学以致用原则,注重实践创新,结合开放实验的特点,力求教材内容符合学生的认识规律,便于学生独立操作。本书以培养实践创新能力为核心目标,以新能源综合利用、毛细管生态空调等创新实验平台和火电厂仿真实验平台为载体,从单元到系统,开设系统化创新实验项目,构建课程实验、特色实验、自主创新实验、岗位实践四层次递进式实验内容体系。

本书由中国矿业大学电力工程学院韩东太担任主编,负责全书统稿。各章编写分工如下:第一章由中国矿业大学电力工程学院何光艳编写;第二章由中国矿业大学电力工程学院任燕燕编写;第三章由中国矿业大学电力工程学院高云鹏编写;第四章由韩东太编写;第五章由中国矿业大学电力工程学院晁阳编写;第六章由中国矿业大学电力工程学院王利军编写。

全书由中国矿业大学郭楚文教授主审。

在编写过程中,收集并参考了国内一些院校及厂家的相关资料,力求使内容更加完整;同时也得到了中国矿业大学电力工程学院杨莹莹、史玉凤、申双林等老师以及中国矿业大学教务部王琪、郭朝霞等同志的全力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见。

编 者

2016.3

目 录

第一章 量热与热物性测定实验	1
第一节 比表面积及孔径分布测定实验	1
第二节 差示扫描量热分析实验	17
第三节 激光法粒度分布测定实验	25
第四节 工业分析实验	31
第五节 元素分析实验	36
第六节 全硫测定实验	44
第七节 灰熔融性测定实验	51
第八节 发热量测定实验	55
第二章 热工控制实验	61
第一节 热工控制实验系统	61
第二节 对象特性测试实验	69
第三节 单回路控制系统实验	77
第四节 串级控制系统实验	88
第五节 比值控制系统实验	103
第六节 前馈—反馈控制系统实验	108
第七节 滞后控制系统实验	114
第八节 解耦控制系统实验	119
第九节 研究性综合实验	126
第三章 新能源综合利用实验	132
第一节 风光互补发电实验	132
第二节 固体氧化物燃料电池性能评价实验	140
第三节 水体影响辐射实验	150
第四节 建筑热环境实验	152
第五节 热管式太阳能集热器瞬时效率实验	159

第四章 毛细管辐射空调实验	164
第一节 毛细管辐射空调系统.....	164
第二节 毛细管辐射空调实验.....	166
第三节 毛细管网呼吸式空调柜.....	175
第四节 毛细管网呼吸式空调柜实验.....	177
第五章 火电厂虚拟仿真实验	183
第一节 概述.....	183
第二节 1 000 MW 仿真系统概述	188
第三节 1 000 MW 机组启动操作实验	196
第四节 1 000 MW 机组停机操作实验	208
第五节 1 000 MW 机组极热态启动操作实验	213
第六节 1 000 MW 机组事故处理仿真操作试题	220
第六章 流动与传热虚拟仿真实验	232
第一节 概述.....	232
第二节 系统配置.....	236
第三节 基于 Fluent 的圆管数值模拟实验	237
第四节 基于 ANSYS Fluent 的两相流分析	245
第五节 混合弯管中流体流动与传热数值模拟实验.....	257
参考文献	272

第一章 量热与热物性测定实验

量热技术就是从共性的角度,研究如何测量反应热和输运热以及如何更准确、更简便地测量。具体而言,量热技术包括:温度测量技术、卡计(量热计)设计和使用技术、热流计设计和使用技术等。材料的热物理性能(Thermophysical Property)是指材料在热学过程中所表现出来的反映各种热力学特性参数的总称,它系统地反映了材料的载热能力和热输运能力。热物性参数包括:密度、比热、热导率、热扩散率、溶解热、热膨胀系数、黏度、表面发射率与吸收率、熔点、沸点等。影响材料热物性的有化学成分、物质形态、结构、晶格振动、分子热运动、杂质分布、气孔率、气孔大小及分布等因素。影响热物性的因素很多,很复杂,不能进行精确计算,主要依靠实验测定。量热技术和热物性测定实验的意义在于作为评价、衡量材料能否适用于具体热过程的技术依据,获得对热过程进行研究、计算和工程设计的关键参数,揭示材料的相变、缺陷、微裂纹和晶化等微观结构变化。

量热技术和热物性测定是工程热物理研究的基础,是一切与热有关的实验和监测的技术基础。无论在现代工业赖以生存和发展的能源动力工程,还是在新兴技术领域,或是在人们的日常生活中,都可以感受到它所发挥的巨大作用。如:工业炉窑、热流输送管道的热效率评价,化工中各种反应过程的热变化,电子设备的散热,石油的热采技术,火箭的发射和卫星的回收等等,无不有热问题存在,无不与量热技术息息相关。新兴的生物工程、生命科学、人体科学的研究中,也应用到了量热技术。应用量热技术可以在许多研究领域做出开拓性的贡献,如:历史上用量热技术曾精确地测出热功当量,推动了热力学的发展;傅立叶的导热定律、牛顿的热交换定律的诞生莫不是以热实验为前导的。掌握量热技术和热物性测定实验方法,可以在节约能源、提高设备热效率和发掘新材料、认识新领域等方面带来极大的经济效益。

第一节 比表面积及孔径分布测定实验

一、比表面积及孔径测试方法

比表面积测试方法有两种分类标准:一是根据测定样品吸附气体量方法的不同可分为:连续流动法、容量法及重量法,重量法现在基本上很少采用;二是根

据计算比表面积理论方法不同可分为：直接对比法、Langmuir 法和 BET 法等。同时这两种分类标准又有着一定的联系，直接对比法只能采用连续流动法来测定吸附气体量，而 BET 法既可以采用连续流动法，也可以采用容量法来测定吸附气体量。其关系如图 1-1 所示。

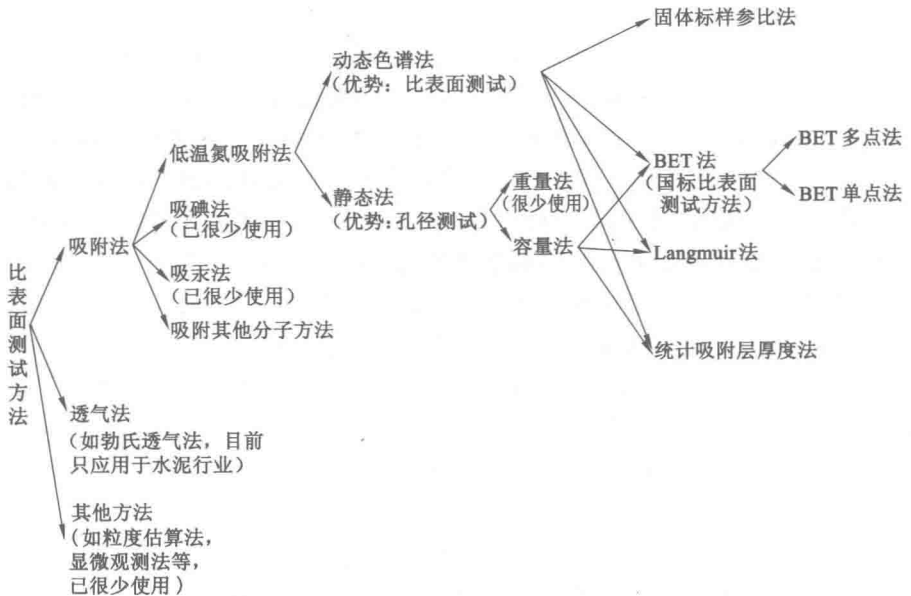


图 1-1 比表面积测试方法分类

1. 连续流动法

连续流动法是相对于静态法而言的，整个测试过程在常压下进行，吸附剂在处于连续流动的状态下被吸附。连续流动法是在气相色谱原理的基础上发展而来的，借由热导检测器来测定样品吸附气体量。连续动态氮吸附是以氮气为吸附气，以氦气或氢气为载气，两种气体按一定比例混合，使氮气达到指定的相对压力，流经样品颗粒表面。当样品管置于液氮环境下时，粉体材料对混合气中的氮气发生物理吸附，而载气不会被吸附，造成混合气体成分比例变化，从而导致热导系数变化，这时就能从热导检测器中检测到信号电压，即出现吸附峰。吸附饱和后让样品重新回到室温，被吸附的氮气就会脱附出来，形成与吸附峰相反的脱附峰。吸附峰或脱附峰的面积大小正比于样品表面吸附的氮气量的多少，可通过定量气体来标定峰面积所代表的氮气量。通过测定一系列氮气分压 p/p_0 下样品吸附氮气量，可绘制出氮等温吸附或脱附曲线，进而求出比表面积。通常利用脱附峰来计算比表面积。连续流动法测试过程操作简单，消除系统误差能

力强,同时可采用直接对比法和 BET 法进行比表面积理论计算。

2. 容量法

容量法中,测定样品吸附气体量多少是利用气态方程来计算的。在预抽真空的密闭系统中导入一定量的吸附气体,通过测定出样品吸脱附导致的密闭系统中气体压力变化,利用气态方程 $pV/T=nR$ 换算出被吸附气体摩尔数变化。

3. 直接对比法

直接对比法是利用连续流动法来测定吸附气体量,测定过程中需要选用标准样品(经严格标定比表面积的稳定物质)并联到与被测样品完全相同的测试气路中,通过与被测样品同时进行吸附,分别进行脱附,测定出各自的脱附峰。在相同的吸附和脱附条件下,被测样品和标准样品的比表面积正比于其峰面积大小。计算公式如下:

$$S_x = \frac{A_x \times W_0}{A_0 \times W_x} \times S_0 \quad (1-1)$$

式中, S_x 为被测样品比表面积; S_0 为标准样品比表面积; A_x 为被测样品脱附峰面积; A_0 为标准样品脱附峰面积; W_x 为被测样品质量; W_0 为标准样品质量。

直接对比法的优点:无需实际标定吸附氮气量体积和进行复杂的理论计算即可求得比表面积;测试操作简单,测试速度快,效率高。缺点:当标样和被测样品的表面吸附特性相差很大时,如吸附层数不同,测试结果误差会较大。

直接对比法仅适用于与标准样品吸附特性相接近的样品测量,由于 BET 法具有更可靠的理论依据,目前国内外更普遍认可 BET 法对比表面积进行测定。

4. BET 法

BET 法理论计算建立在 Brunauer、Emmett 和 Teller 三人从经典统计理论推导出的多分子层吸附公式基础上,即著名的 BET 方程:

$$\frac{p}{V(p_0 - p)} = \frac{1}{V_m \cdot C} + \frac{C-1}{V_m \cdot C} \times \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (1-2)$$

式中, p 为吸附质分压; p_0 为吸附剂饱和蒸气压; V 为样品实际吸附量; V_m 为单层饱和吸附量; C 为与样品吸附能力相关的常数。

由式(1-2)可以看出, BET 方程建立了单层饱和吸附量 V_m 与多层吸附量 V 之间的数量关系,为比表面积测定提供了很好的理论基础。

BET 方程建立在多层吸附的理论基础之上,与许多物质的实际吸附过程更接近,因此测试结果可靠性更高。实际测试过程中,通常实测 3~5 组被测样品在不同气体分压下多层吸附量 V ,以 p/p_0 为 x 轴, $p/V(p_0 - p)$ 为 y 轴,由 BET

方程作图进行线性拟合,得到直线的斜率和截距,从而求得 V_m 值计算出被测样品比表面积。理论和实践表明,当 p/p_0 取点在 $0.05 \sim 0.35$ 范围内时,BET 方程与实际吸附过程相吻合,图形线性也很好,因此实际测试过程中选点需在此范围内。由于选取了 $3 \sim 5$ 组 p/p_0 进行测定,通常我们称之为多点 BET。当被测样品的吸附能力很强,即 C 值很大时,直线的截距接近于零,可近似认为直线通过原点,此时可只测定一组 p/p_0 数据与原点相连求出比表面积,我们称之为单点 BET。与多点 BET 相比,单点 BET 结果误差会大一些。若采用流动法来进行 BET 测定,测量系统需具备能精确调节气体分压 p/p_0 的装置,以实现不同 p/p_0 下吸附量测定。对于每一点 p/p_0 下 BET 吸脱附过程与直接对比法相近似,不同的是 BET 法需标定样品实际吸附气体量的体积大小,而直接对比法则不需要。BET 理论与物质实际吸附过程更接近,可测定样品范围广,测试结果准确性和可信度高,特别适合科研及生产单位使用。

5. 孔径分布测试

气体吸附法孔径(孔隙度)分布测定利用的是毛细凝聚现象和体积等效代换的原理,即以被测孔中充满的液氮量等效为孔的体积。吸附理论假设孔的形状为圆柱形管状,从而建立毛细凝聚模型。由毛细凝聚理论可知,在不同的 p/p_0 下,能够发生毛细凝聚的孔径范围是不一样的,随着 p/p_0 值增大,能够发生凝聚的孔半径也随之增大。对应于一定的 p/p_0 值,存在一临界孔半径 R_K ,半径小于 R_K 的所有孔皆发生毛细凝聚,液氮在其中填充,大于 R_K 的孔皆不会发生毛细凝聚,液氮不会在其中填充。临界半径可由凯尔文方程给出:

$$R_K = -0.414 / \lg(p/p_0) \quad (1-3)$$

式中, R_K 称为凯尔文半径,它完全取决于相对压力 p/p_0 。凯尔文公式也可以理解为对于已发生凝聚的孔,当压力低于一定的 p/p_0 时,半径大于 R_K 的孔中凝聚液将汽化并脱附出来。理论和实践表明,当 p/p_0 大于 0.4 时,毛细凝聚现象才会发生,通过测定出样品在不同 p/p_0 下凝聚氮气体量,可绘制出其等温吸脱附曲线,通过不同的理论方法可得出其孔容积和孔径分布曲线。最常用的计算方法是利用 BJH 理论,通常称之为 BJH 孔容积和孔径分布。

本节以 V—Sorb 2800P 型比表面积及孔隙度测定仪为例,介绍比表面积和孔径检测仪器的原理及实验方法,如图 1-2 所示。主机采用静态容量法测量原理,可进行 Langmuir 法比表面积测定、BET 法比表面积测定、BJH 法孔径分布测定、真密度测定、吸附常数 C 测定、炭黑外表面积测定。

二、性能参数

主机功能:吸附及脱附等温线测定,Langmuir 法比表面积测定,BET 法比表面积测定(单点及多点),平均粒径估算,T-plot 图法外比表面积测定,样品真

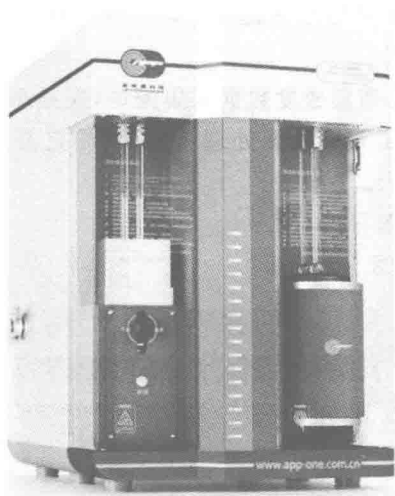


图 1-2 V—Sorb 2800P 型比表面积及孔隙度测定仪

密度测定, BJH 总孔体积及孔径分布分析, T-plot 图法微孔分析, HK 微孔分析。

测定范围: $0.01 \text{ m}^2/\text{g} \sim \infty$ (比表面积), $0.35 \sim 2 \text{ nm}$ (微孔), $2 \sim 500 \text{ nm}$ (中孔或介孔)。

测量精度: 重复性误差小于 1.5% 。

样品类型: 粉末、颗粒、纤维及片状材料等。

样品数量: 同时进行 2 个样品分析和 2 个样品脱气处理。

测试气体: 吸附质为高纯氮气 ($\geq 99.999\%$) 或其他 (按需选择如 Ar, Kr)。

真空系统: 集装式管路及电磁阀控制系统, 大大减小管路死体积空间, 提高检测吸附气体微量变化的灵敏度, 从而提高孔径分布测定的分辨率; 同时集装式管路减少了连接点, 大大提高密封性和仪器使用寿命。

液位控制: 液氮面控制系统, 确保测试全程液氮面相对样品管位置保持不变, 彻底消除因死体积变化引入的测量误差。

控制系统: 采用可编程控制器电磁阀控制系统, 具有高集成度和抗干扰能力, 提高仪器稳定性和使用寿命。

压力测量: 采用压力分段测量的进口双压力精密传感器, 显著提高了仪器在低 p/p_0 点下的测试精度, $0 \sim 1\,000 \text{ Torr}$ ($0 \sim 133 \text{ kPa}$), $0 \sim 10 \text{ Torr}$ ($0 \sim 1.33 \text{ kPa}$)。

压力精度: 进口硅薄膜压力传感器, 精度达实际读数的 0.15% , 优于全量程的 0.15% , 远高于皮拉尼电阻真空计精度 (一般误差为 $10\% \sim 15\%$)。

分压范围： p/p_0 准确可控范围达 $5 \times 10^{-6} \sim 0.995$ ，极限真空达 4×10^{-2} Pa (3×10^{-4} Torr)。

数据采集：高精度及高集成度数据采集模块，误差小，抗干扰能力强。

数据处理：Windows 兼容数据处理软件，功能完善，操作简单，多种模式数据分析，图形化数据分析结果报表。

三、仪器外观结构图

仪器正面如图 1-3、图 1-4 所示。

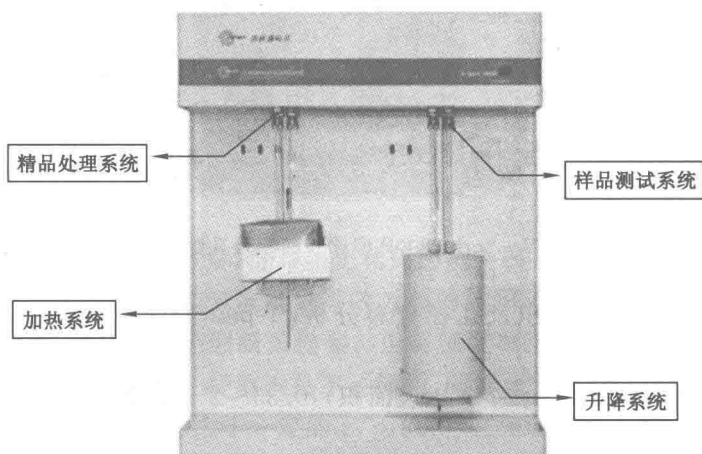


图 1-3 仪器正面

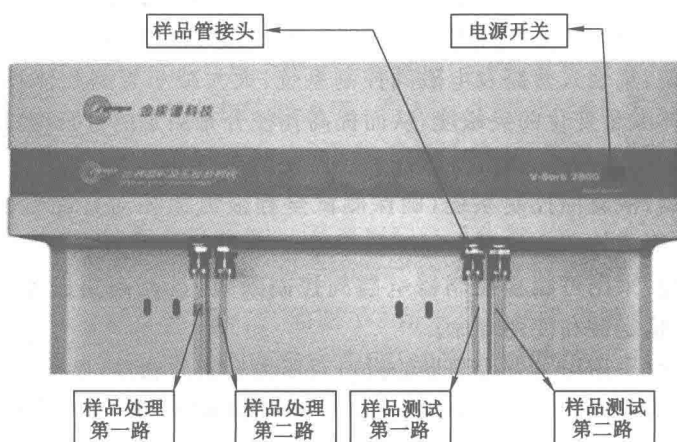


图 1-4 仪器正面上部细节

仪器背面及侧面如图 1-5、图 1-6 所示。

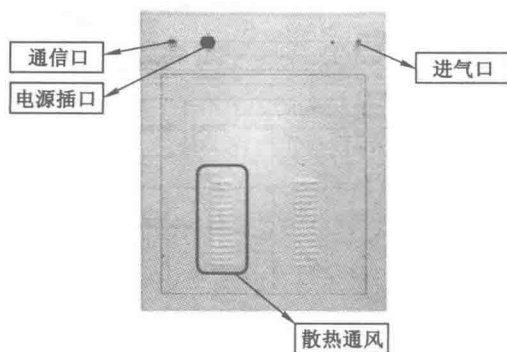


图 1-5 仪器背面图

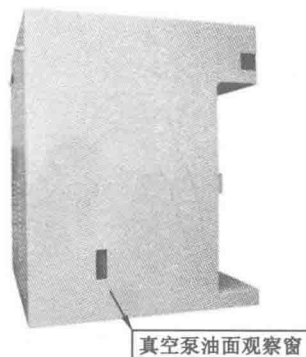


图 1-6 仪器侧面

四、操作软件

软件工作界面如图 1-7 所示。其中标准工具条中图区 V 所示样品管路选 1 时,四个区域显示的为样品 1 的信息,当选 2 时,显示为样品 2 的信息。工作界面分为实验工作区 I、实验控制区 II、实验状态区 III、日志区 IV 四个部分。

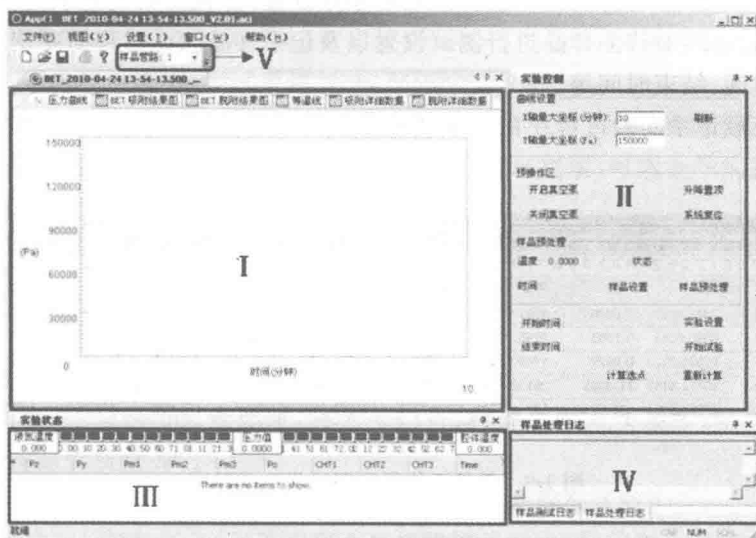


图 1-7 软件工作界面

如图 1-7 中区 I 所示,显示实验的进行过程以及最终结果,包括图 1-8 所示的压力曲线、等温线、BET 曲线、吸脱附详细数据等。



样品测试:对待测样品进行测试设置以及记录样品测试过程简要信息,如测试开始时间、结束时间等。

Ⅲ区域记录实验过程中的主要参数值,如压力值、温度值、时间值等,如图1-9所示。

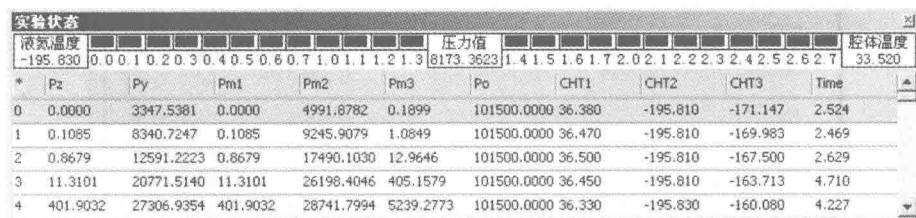


图 1-9 软件工作界面图区Ⅲ生成界面

IV 区域是日志区,显示包括样品处理日志和样品测试日志,记录样品处理或测试的详细信息。

五、具体操作方法

1. 减压阀的使用方法

减压阀各部分位置及组成如图 1-10 所示。

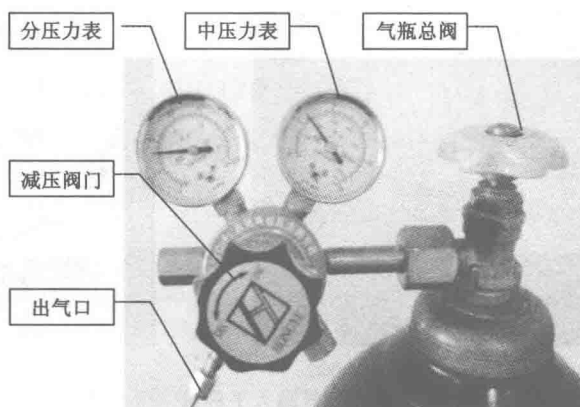


图 1-10 减压阀组成

(1) 打开气瓶总阀门之前务必检查减压阀阀门是否处于关闭状态,具体方法:旋动黑色旋钮使其处于自然松动状态,此时阀门处于关闭状态。

(2) 逆时针旋开气瓶总阀门,总压力表显示气瓶中实际气体压力,随着气体的使用,该压力会下降。

(3) 打开减压阀阀门:往 INC 方向旋转调节出气口压力,旋转速度要慢,分压力表显示出气口压力,测试采用 0.04 MPa。

(4) 关闭减压阀阀门:往 DEC 方向旋转关闭出气口压力,旋转至旋钮处于自然松动为止;如果继续往 DEC 方向旋转,阀门越来越紧,可能会导致旋钮脱落以致减压阀损坏。

(5) 由于减压阀腔体中存有剩余气体,所以关闭减压阀阀门之后压力表指针未回落。

2. 样品称量

电子天平称量方法如图 1-11 所示。

(1) 取一个 100 mL 锥形瓶,将天平归零,将样品管立于瓶中,防止样品倒出,称量样品管质量 M_1 。

(2) 将漏斗插入样品管底部,不要让样品黏在两端细管壁上。

(3) 对于大颗粒样品,可不用漏斗直接将样品装入,但管壁上残留的粉末需要擦去。

(4) 称量样品与样品管的总质量 M_2 。

3. 样品管安装与拆卸

样品管安装与拆卸如图 1-12 所示。

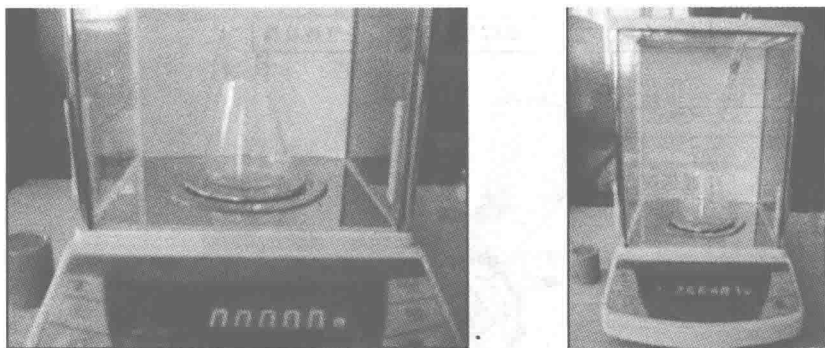


图 1-11 样品天平称量

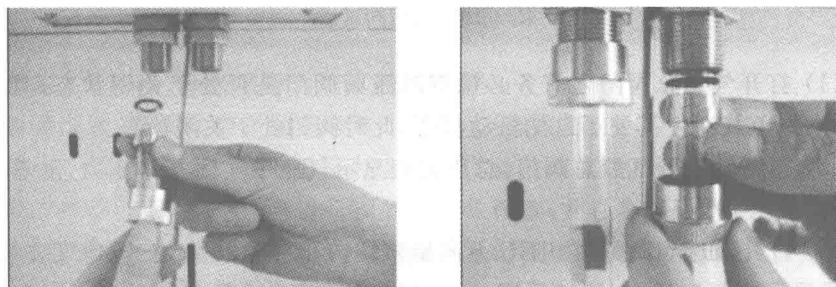


图 1-12 样品管安装与拆卸

(1) 将螺母套在样品管上,再套上密封圈,密封圈距管口大约 10 mm。

(2) 安装样品管:将样品管插进接头中,再拧上螺母,直至密封圈顶置接头上端面;为达到最佳密封效果,再用手将螺母旋紧后,建议用金属钳将螺母旋约 $1/4$ 圈。

(3) 拆卸样品管:将螺母拧松,同时拧下时切记用手扶住螺母,以免螺母突然掉落磕坏样品管。

4. 样品处理

(1) 样品处理注意事项

① 温度:首先处理温度必须在样品能够承受的温度范围内;通常最低温度是 105°C ,一般处理温度在 $105\sim 200^{\circ}\text{C}$ 之间。

② 真空:为了提高效率并且防止个别样品被氧化,建议抽真空。

③ 时间:一般 $3\sim 5\text{ h}$ 。

④ 对于同种样品建议处理条件统一,样品处理条件不同,会引起测量误差,

导致结果有所偏差。

(2) 样品预处理

样品预处理操作界面如图 1-13 所示。

处理管路	管路名称	样品管体积	样品名称	样品质量	样品体积
☒	样品管一	10.0000 ml		8.00000 g	10.0000 ml
☒	样品管二	10.0000 ml		8.00000 g	10.0000 ml

第一阶段	延迟时间	处理时间	处理温度
	600 分钟	60 分钟	80

第二阶段	处理时间	抽气次数	充气次数	充气温度	升温速率
	200 分钟	100	80	40	1

实验信息	样品编号	样品名称	送检单位	处理条件	操作人员	核对人员	检测单位	环境温度	送检日期

图 1-13 样品预处理操作界面

① 点击“样品设置”，填写完整的预处理信息。

测试区域选择：“样品预处理”。

选择对应的处理管路(仪器左边为预处理区域，左起依次为样品管一、样品管二)。

延迟时间：即样品预处理在所设时间之后开始，例如，延迟时间设置 600 min，即 600 min 后开始第一阶段的加热。鉴于样品在预处理刚结束后表面活性最好，吸附能力最强，在无人看守时可根据预处理所需时间设置延迟时间。

第一阶段：该阶段为常压加热处理，一般取默认值 80 ℃ 加热 60 min。

第二阶段：该阶段为抽真空加热处理，按样品预处理中所述，填写处理温度及处理时间，抽气次数、充气次数、充气温度及升温速率均取默认值。

样品预处理的实验信息区信息不会形成对应的文件名，客户无特殊需要可不填写。

② 填写完成后点击“保存”，点击“样品预处理”，如图 1-14 所示。