

# 水环境工程实验

黄忠臣 主编

SHUIHUANJING  
GONGCHENG SHIYAN



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 水环境工程实验

黄忠臣 主编



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书涵盖了给水排水工程、大气污染控制工程、固体废弃物处理与处置、水工程施工、物理性污染与控制等专业课程中的经典实验和科研转化成的实验项目,重点在实验装置和实验方法的设计和更新,使实验更加贴合工程实践,并且易于在教学中实施。主要包括:大气污染控制工程实验、水处理实验技术、固体废弃物处理与处置实验、水工程施工实验、物理性污染与控制实验五大部分。

### 图书在版编目(CIP)数据

水环境工程实验 / 黄忠臣主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2014.1

ISBN 978-7-5170-1749-0

\*. ①水… II. ①黄… III. ①水环境—环境工程—实验 IV. ①X143-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第024089号

书 名	水环境工程实验
作 者	黄忠臣 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 190千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

本书是给水排水工程、大气污染控制工程、固体废物处理与处置、水工程施工、物理性污染与控制等工程中的经典实验和科研转化成的实验项目，重点在实验装置和实验方法的设计和更新，使实验更加贴合工程实践，并且易于在教学中实施。

# 前言



随着我国经济的快速发展，环境污染日趋严重，尤其是水环境污染。我国北方 2012 年冬天开始的严重雾霾，大量垃圾的产生和处理，污水的超标排放，更加重了水环境的污染。在传统的环境污染处理工艺和原理的基础上，给水排水科学与工程、环境科学及环境工程等相关学科，也取得了长足的发展，其新技术、新理论、新工艺日新月异。高等学校相应的专业实验教学，在实验内容和实验装置工艺等方面，也需要跟上科技发展的脚步，只有这样才能使学生打好基础，为日后创新和施展才干创造条件。

本书涵盖了给水排水工程、大气污染控制工程、固体废物处理与处置、水工程施工、物理性污染与控制等工程中的经典实验和科研转化成的实验项目，重点在实验装置和实验方法的设计和更新，使实验更加贴合工程实践，并且易于在教学中实施。

全书共分 5 章：大气污染控制工程实验，水处理实验技术，固体废物处理与处置实验，水工程施工实验，物理性污染与控制实验。本书第 1 章、第 2 章部分实验、第 3 章~第 5 章全部实验由黄忠臣编写；第 2 章 2.1~2.6、2.11~2.13 由王先兵编写；第 2 章 2.7、2.17、2.24、2.25 由秦纪伟编写；第 1 章 2.4 由韩芳编写。全书由黄忠臣统稿及定稿，由吴俊奇教授担任主审。

在本书的编写过程中参考了大量的相关书籍和资料，其中主要的参考文献附于书后，在此，谨向这些著作的作者们表示诚挚的感谢。

由于水环境实验技术日新月异，且涉及知识领域广泛，加之编者

的水平和能力有限，书中的缺点和错误在所难免，恳请专家和读者不吝批评指正。

**黄忠臣**

2013年5月

于北京建筑大学

# 目 录

## 前言

第 1 章 大气污染控制工程实验 .....	1
1.1 颗粒物粒径分布测定实验 .....	1
1.2 有害气体吸收实验 .....	13
1.3 有害气体吸附实验 .....	18
1.4 通风管道系统的风量和风压测定 .....	21
1.5 除尘器性能测定实验 .....	24
第 2 章 水处理实验技术 .....	30
2.1 混凝沉淀实验 .....	30
2.2 过滤实验 .....	34
2.3 筛分实验 .....	37
2.4 臭氧消毒实验 .....	39
2.5 软化实验 .....	43
2.6 离子交换除盐实验 .....	46
2.7 电渗析除盐实验 .....	51
2.8 树脂类型鉴别实验 .....	56
2.9 树脂总交换容量的测定 .....	58
2.10 活性炭吸附实验 .....	61
2.11 颗粒自由沉淀实验 .....	63
2.12 拥挤沉淀实验 .....	68
2.13 污泥比阻测定实验 .....	71
2.14 污泥沉降比和污泥指数 (SVI) 的测定与分析 .....	76
2.15 清水曝气充氧实验 .....	77
2.16 活性污泥法处理系统实验 .....	83
2.17 加压溶气气浮的运行与控制 .....	85
2.18 生物滤池实验 .....	89



2.19	生物转盘实验	92
2.20	膜生物反应器实验	94
2.21	活性污泥吸附性能实验	96
2.22	活性污泥比耗氧速率测定实验	98
2.23	水中特征污染物在土壤中的迁移实验	100
2.24	电泳及 $\zeta$ 电位测定实验	104
2.25	SBR活性污泥法实验	107
<b>第3章</b>	<b>固体废弃物处理与处置实验</b>	<b>110</b>
3.1	固体废弃物含水率的测定	110
3.2	固体废弃物中灰分的测定	111
3.3	固体废弃物热值的测定	113
3.4	好氧堆肥模拟实验	117
3.5	危险废物浸出毒性鉴别实验	120
3.6	垃圾填埋模拟实验	122
<b>第4章</b>	<b>水工程施工实验</b>	<b>126</b>
4.1	压力管道水压实验	126
4.2	无压力管道闭水实验	129
<b>第5章</b>	<b>物理性污染与控制实验</b>	<b>132</b>
5.1	道路和小区噪声测评实验	132
5.2	建筑施工场界噪声的测量	135
<b>附录</b>		<b>138</b>
附录1	常用试剂及配置方法	138
附录2	实验室内急性中毒的防护与急救	140
附录3	GB 3096—1993《城市区域环境噪声标准》	142
附录4	城市杂用水质标准	142
附录5	景观环境用水的再生水水质指标	142
附录6	建筑施工场界噪声限值	143
附录7	常用正交表	143
附录8	氧在蒸馏水中的溶解度(饱和度)	151
<b>参考文献</b>		<b>152</b>

# 第 1 章 大气污染控制工程实验

## 1.1 颗粒物粒径分布测定实验

大气颗粒物对环境气候、能见度等产生巨大的负面影响，不同粒径的大气颗粒污染物对人类健康构成不同程度的威胁，成为人类生存环境中不容忽视的隐形杀手，同时，除尘系统中颗粒物的粒径分布对除尘器选用、除尘系统运转效果有着重要影响。

### 1.1.1 实验目的

- (1) 加深对颗粒物粒径分布及粒径分布函数的理解。
- (2) 学会使用某种设备测定颗粒物粒径分布。

### 1.1.2 实验原理

颗粒物的粒径，通常采用定向直径、等体积直径、筛分直径、斯托克斯 (Stokes) 直径、空气动力学当量直径等表示。

#### 1. 光散射法测定原理

当一束平行的单色光照射颗粒上时，在傅氏透镜的焦平面上将形成颗粒的散射光谱，这种散射光谱不随颗粒运动而改变，通过米氏散射理论分析这些散射光谱就可得出颗粒的粒度分布。假设颗粒为球形且粒径相同，则散射光能按艾里圆分布，即在透镜的焦平面形成一系列同心圆光环，光环的直径与产生散射的颗粒粒径相关，粒径越小，散射角越大，圆环直径就越大。粒径越大，散射角就越小，圆环的直径就越小，如图 1-1 所示。

根据米氏散射原理，当测量区中有一直径为  $d$  的球形颗粒时，任意角度下它的散射光强分布为：

$$I(\theta) = I_0 \frac{\pi^2 d^4}{16 f^2 \lambda^2} \left[ 2 \frac{J_1(X)}{X} \right]^2 \quad (1-1)$$

式中  $f$ ——接收透镜的焦距；  
 $\lambda$ ——入射光的波长；  
 $J_1$ ——一阶贝塞尔函数；

$d$ ——颗粒直径， $X = \pi d \frac{\sin\theta}{\lambda}$ ，其中  $\theta$  为散射角。

激光衍射光强分布落在光电探测器第  $n$  环（环半径从  $S_n$  到  $S_{n+1}$ ，对应的散



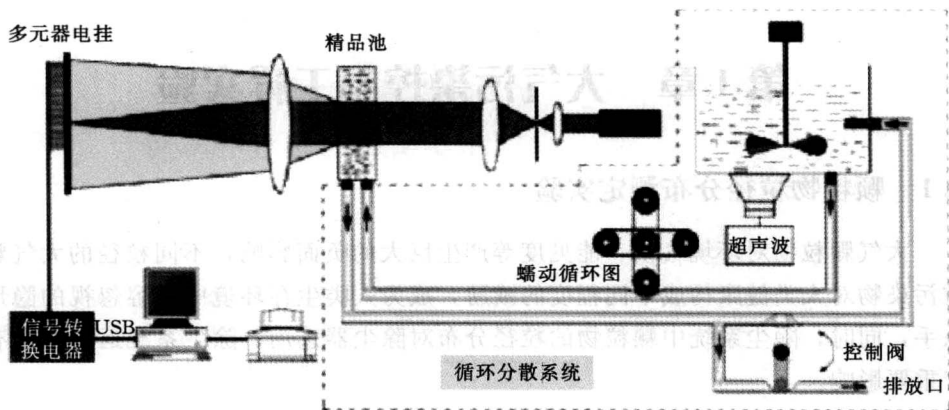
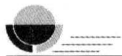


图 1-1 光散射法原理示意图

射角从  $\theta_n$  到  $\theta_{n+1}$ ) 上的光能量为:

$$e_n = \int_{s_n}^{s_{n+1}} I(\theta) 2\pi S dS \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1-2)$$

将式 (1-1) 中的  $I(\theta)$  代入后可得:

$$e_n = \frac{\pi d^2}{4} I_0 [J_0^2(X_n) + J_1^2(X_n) - J_0^2(X_{n+1}) - J_1^2(X_{n+1})] \quad (1-3)$$

式中  $J_0$ ——零阶贝塞尔函数。

如果测量中同时有  $N$  个直径为  $d$  的颗粒存在, 则在第  $n$  个光环上所接收到的光能量将是一个颗粒时的  $N$  倍 ( $N \cdot e_n$ )。以此类推, 当颗粒群中直径为  $d_i$  的颗粒共有  $N_i$  个, 则颗粒群总的衍射光能将是所有各个颗粒衍射光能之和, 即:

$$e_n = \frac{\pi I_0}{4} \sum N_i d_i^2 [J_0^2(X_{i,n}) + J_1^2(X_{i,n}) - J_0^2(X_{i,n+1}) - J_1^2(X_{i,n+1})] \quad (1-4)$$

如果尺寸分布用重量  $W$  表示,  $W$  和  $N$  之间的关系为:

$$N_i = \frac{6W_i}{\pi \rho d_i^3} \quad (1-5)$$

式中  $\rho$ ——颗粒物质的密度。

将式 (1-5) 代入式 (1-4) 可得:

$$e_n = \frac{3I_0}{2\rho} \sum \frac{W_i}{d_i} [J_0^2(X_{i,n}) + J_1^2(X_{i,n}) - J_0^2(X_{i,n+1}) - J_1^2(X_{i,n+1})] \quad (1-6)$$

式 (1-6) 建立了光电探测器各环的衍射光信号与被测颗粒粒径及分布之间的对应关系。

将式 (1-6) 写成矩阵形式则为:



$$E = TW$$

矩阵  $T$  称为系数矩阵，它与光电探测器的几何尺寸和颗粒的直径分档有关。由式 (1-6) 即可算得系数矩阵，一旦测出全部有效环上的光能分布  $E$ ，通过对式 (1-6) 所列线性方程组的求解，就能得到颗粒尺寸的重量分布  $W$ 。

## 2. 沉降法测定原理

悬浮在液体中的颗粒在重力、浮力和黏滞阻力的作用下，其运动方程符合 Stokes 定律：

$$V = (\rho_s - \rho_f)g18\nu X^2 \quad (1-7)$$

式中  $V$ ——沉降速度， $\mu\text{m/s}$ ；

$X$ ——颗粒直径， $\mu\text{m}$ ；

$\rho_s$ ——颗粒比重， $\text{g/cm}^3$ ；

$\rho_f$ ——液体比重， $\text{g/cm}^3$ ；

$g$ ——重力加速度， $\text{m/s}^2$ ；

$\nu$ ——液体的黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

由式 (1-7) 可知，颗粒的沉降速度与粒径的平方成正比。因此，只要测定颗粒的沉降速度，就可以知道它的粒径了。沉降式粒度仪均采用测定不同时刻透过悬浮液的光强的变化率来间接反映颗粒的沉降速度，如图 1-2 所示。

测试时间	$t_0$	<	$t_1$	<	$t_2$	<	$t_3$
光强	$I_0$	<	$I_1$	<	$I_2$	<	$I_3$
粒径	$X$	>	$X_1$	>	$X_2$	>	$X_3$

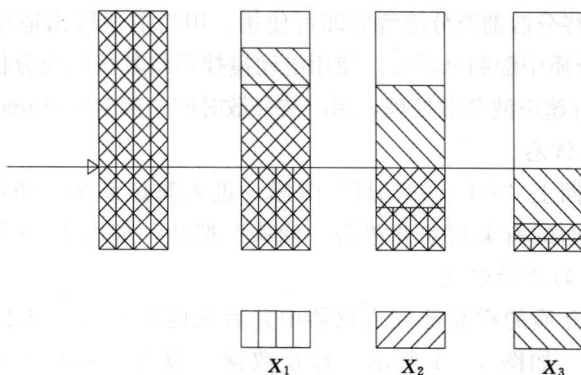
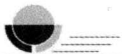


图 1-2 沉降法原理示意图

根据 Lambert-beer 定律，有：

$$\lg I = \lg I_0 - K \int_0^\infty n_x X^2 dx \quad (1-8)$$

式中  $K$ ——仪器常数；



$n_x$ ——在光路中存在的直径为  $X \sim X + dx$  的颗粒的个数；

$I_0$ ——透过纯净液体的光强；

$I$ ——透过悬浊液的光强。

根据式 (1-7) 给出的粒径和沉降时间的关系，在整个沉降过程中连续检测光强的变化，再根据式 (1-8) 求出某粒径在相应时刻光的透过率的对数，就可以求出该样品的粒度分布了。

### 1.1.3 设备、仪器与用具

颗粒物粒径分布测定实验所用到的设备、仪器与用具如下：

- (1) BT-9300H 激光粒度仪。
- (2) BT-3000A 圆盘超细粒度分布仪。
- (3) 超声波分散器。
- (4) 电动搅拌器。
- (5) 200mL、100mL 和 50mL 烧杯。
- (6) 蒸馏水。

### 1.1.4 操作步骤和方法

#### 1.1.4.1 光散射法测定步骤

光散射法主要设备为 BT-9300H 激光粒度仪。

##### 1. 实验试样准备

将分散剂如六偏磷酸钠或焦磷酸钠等溶于纯净水中，配制成 2%~5% 的沉降介质 120mL 左右，待分散剂充分溶解后即可使用。用勺取法取出适量实验样品加入到约 80mL 的沉降介质中配制悬浮液，使用电动搅拌器将其进行充分搅拌，同时放到超声波分散器上进行超声波分散处理，超声波分散时间一般为 3~15min。

##### 2. 输入测试信息

双击电脑桌面上“BT-9300H”图标，进入测试系统。单击“测量—文档”项，输入测试方面的有关信息并单击“确认”按钮，如图 1-3 所示。

##### 3. 测量介质的背景浓度

将装有纯净介质的样品池放入仪器中并启动搅拌装置，单击“测量”按钮进入“测量”窗口，如图 1-4 所示。背景数据一般为 5~10 之间。单击“启动”按钮测量本次背景数据，单击“确认”按钮保存本次背景数据。若背景数据超过 10 以上，需清洗样品池，重新测量背景数据。

##### 4. 测量样品浓度

将装有悬浮液的样品池放入仪器中并启动搅拌装置，如图 1-5 所示。单击单次测试中“测试”按钮测量样品的浓度，单击“结果”按钮保存浓度数据并返

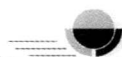


图 1-3 测试文档

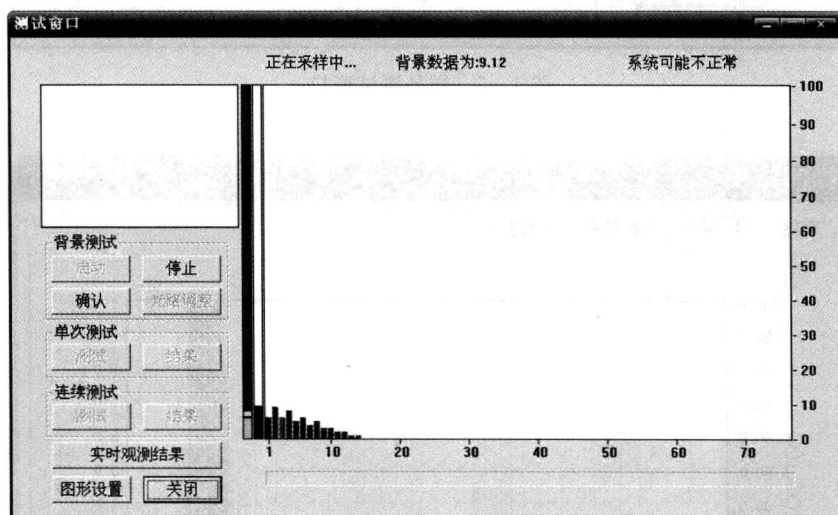


图 1-4 测量背景窗口

回，单击“关闭”按钮结束测试。样品浓度一般在 10~30 之间，超出此范围需要重新配置悬浮液。

### 5. 测试

放入实验样品，样品浓度一般在 10~30 之间，即浓度在如图 1-5 所示中的电脑中绿色区间范围，超出此范围需要重新配置悬浮液。单击单次测试栏中“测试”按钮则开始进行粒度测试并计算粒度分布数据，测试结束后单击“结果”按钮则显示测试结果，测试结果分表格、图形、典型结果及余值图 4 种形式显示，如图 1-6 所示。

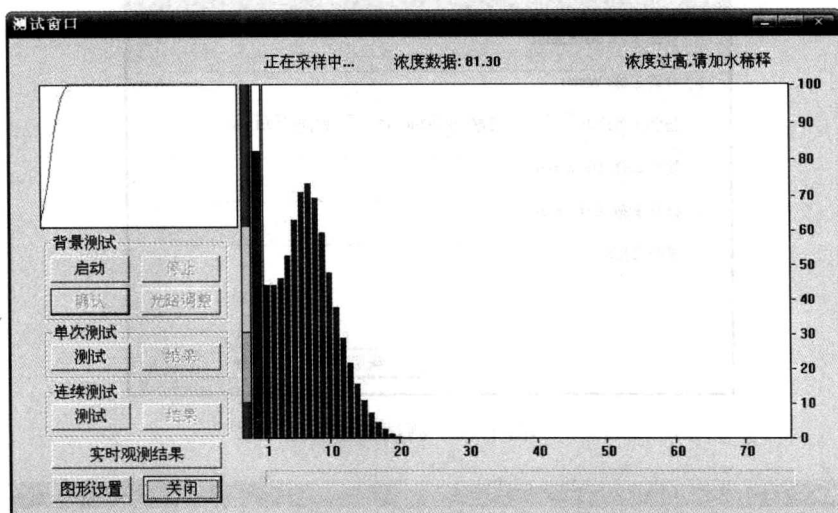


图 1-5 样品测试窗口

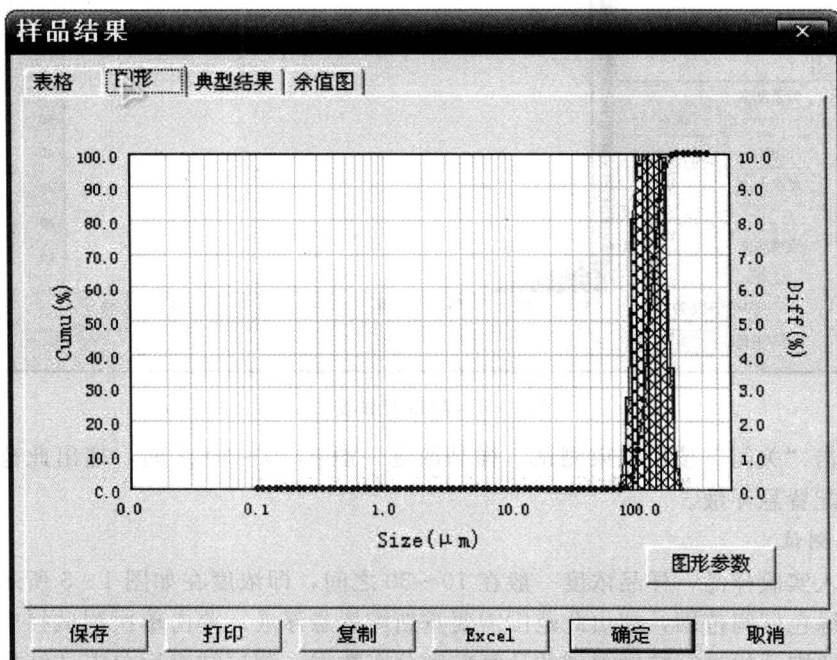
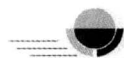


图 1-6 样品结果查看窗口



## 6. 保存或打印

在测量结果窗口中可以对样品测量数据进行保存、打印、复制和导出 Excel 等操作。

### 注意事项:

(1) 开机顺序: 交流稳压电源→粒度仪→打印机→显示器→计算机。

关机顺序: 显示器→计算机→打印机→粒度仪→交流稳压电源。

(2) 在进行超声分散之前, 应保证超声波分散器的槽中有占其容积 1/3 的水。

(3) 配制悬浮液的关键是要掌握好样品的浓度。由于样品粗细程度、比重和光学特性等各不相同, 所以对不同样品来说悬浮液的浓度也各不相同。一般说来, 样品越细, 用量越少; 样品越粗, 用量就越多。悬浮液的浓度最终要满足测量时光能分布的要求, 一般光能分布为 10%~30% 之间, 特殊情况应根据实验确定。

(4) 取溶液时用特制的注射器从溶液中部移动抽取 14~15mL, 注入样品池中, 同时应擦干样品池表面的水珠及水迹。

### 1.1.4.2 沉降法测定步骤

沉降法测定主设备为 BT-3000A 圆盘超细粒度分布仪。

#### 1. 配制沉降介质

该仪器常用的介质为蒸馏水+甘油。不同样品所用的甘油比例不同。粒度较粗 ( $D_{50} > 2\mu\text{m}$ ) 或密度较大 (密度  $> 4$ ) 的样品, 甘油比例一般在 40%~60%; 粒度较细 ( $D_{50} < 0.5\mu\text{m}$ ) 或密度较小 (密度  $< 2.7$ ) 的样品, 甘油比例一般在 20%~40%。将蒸馏水倒入量具, 调整好体积, 在往里慢慢倒甘油; 用搅拌器搅拌后, 将其放入超声波分散器里分散 15min 或静置 24h (总体积约 120mL)。

#### 2. 配置悬浮液 (往往要试配几次)

用烧杯取沉降介质约 10mL, 加入适量分散剂 (焦磷酸钠) 待其充分溶解后, 加入实验样品, 使其浓度在 0.01%~0.3% 之间, 将该悬浮液放入超声波分散器里分散 8min 后, 取样 1mL 试测 (见步骤 4 和 5)。当测试曲线的最高处达到测试窗口纵坐标的 5~7 之间时, 该悬浮液的浓度合适。如不合适, 须重新配置, 直到合适为止。通常, 样品越细, 所需浓度越低; 样品越粗, 所需浓度越高。

#### 3. 输入测试信息

双击电脑桌面“粒度测试 BT-3000A”图标, 即进入测试系统, 如图 1-7 所示; 在菜单栏中单击“测试—开始测试”项, 即进入“参数设定”界面, 输入相应参数, 选择测试方式, 如图 1-8 所示。



图 1-7 测试界面

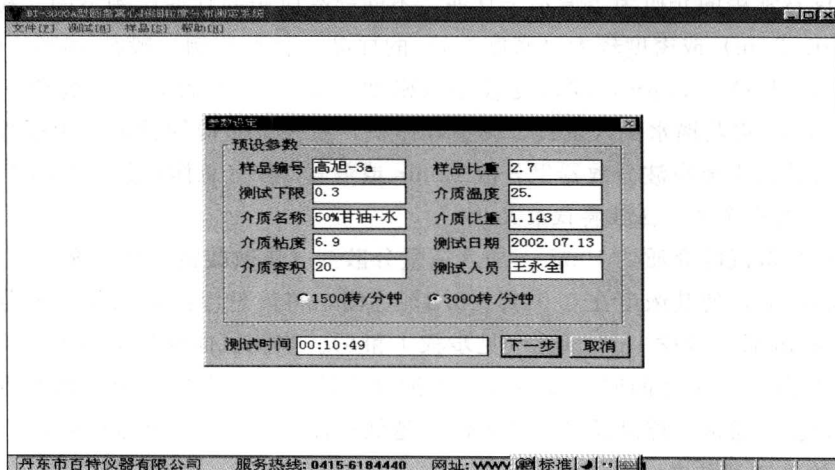


图 1-8 参数设定

#### 4. 测定本底值

用清水将离心圆盘冲洗干净，启动离心机，用注射器取一定量（如 18mL）





的已经配制好的甘油水溶液注入离心圆盘中做沉降介质。单击如图 1-9 所示中的“开始”按钮，系统就进入本底值测定状态。此时的吸光度应在 1000~3000 之间，并在如图 1-9 所示的绿色区域内连续画水平线。

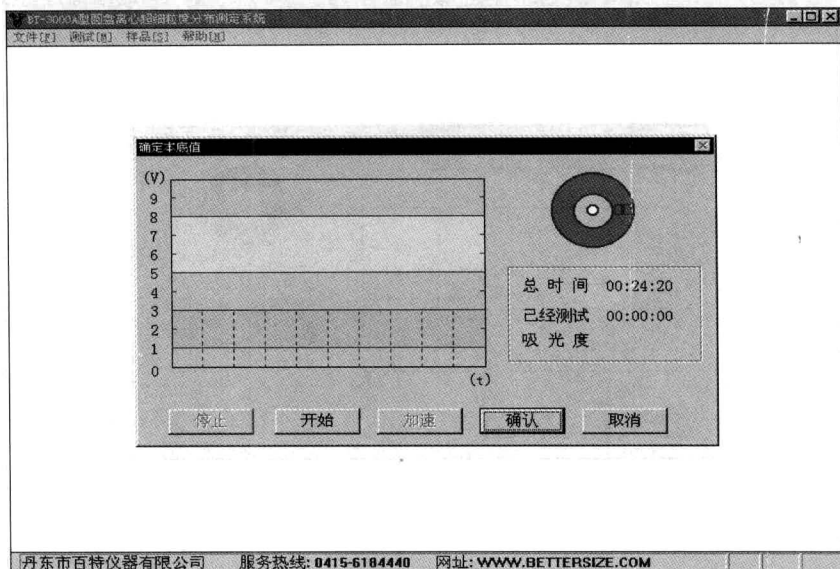


图 1-9 测定本底值

如果系统本底值的吸光度不在绿色区域，应调整仪器上的“基准调节器”。通常应将系统本底值的吸光度调整到 1500 左右。

当经过约 30s 时间系统本底值稳定后，用注射器再向离心圆盘中注入 1mL 缓冲液（蒸馏水）。注入缓冲液之后按“加速”按钮，这时电机原来的匀速旋转状态将瞬间改变为变速旋转状态，圆盘中沉降介质表面与缓冲液之间将进行接触、摩擦和融合，在原来沉降介质的表面形成过渡层，为接下来的测试做好准备。注射缓冲液并单击“加速”按钮后系统本底值可能会有波动现象，此现象经过数秒左右的旋转后就会稳定下来。“加速”按钮可以多按几次，直到电机变速使曲线的波动很小为止，这时沉降介质和缓冲液已经很好地融合，待系统本底值平稳后单击“停止”按钮结束系统本底值测试。这时单击“确认”按钮进行下面的测试。

#### 5. 测试过程

在图 1-9 中调整好系统本底值后，单击“确认”按钮，就进入到实际样品的测试过程阶段，如图 1-10 所示。测试开始前，电脑系统处于一个等待注射样品状态。用仪器配带的专用注射器取 1mL 样品，将针头插入圆盘外面的针孔内，使针头后的垂直定位板顶住有机玻璃板的外面，针头指向圆盘中部（并非圆心），



用拇指迅速推进注射器，瞬间将样品注射到离心圆盘中。在推进结束时用拇指推力触发注射器上的微动开关，启动电脑使其进入测试状态。

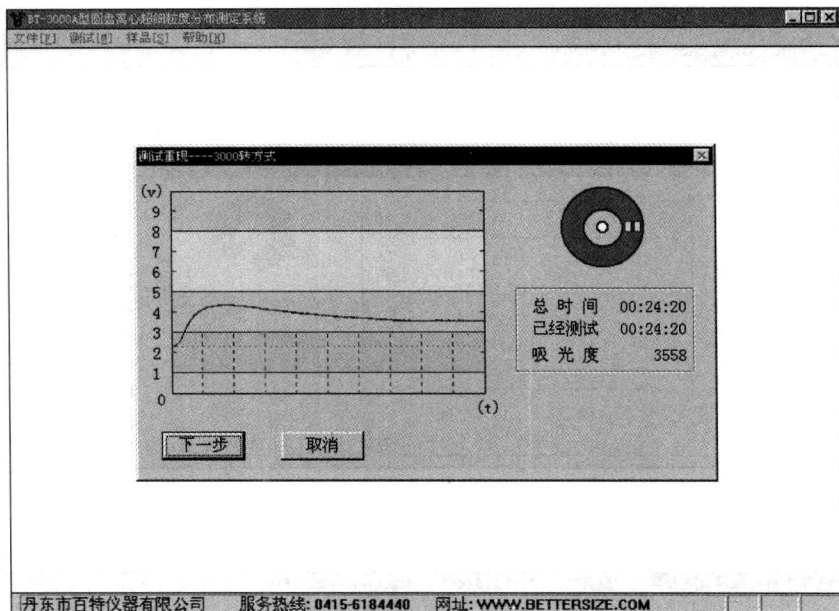


图 1-10 样品测试过程

在整个测试过程中，颗粒的沉降状态以测试曲线的形式显示在屏幕中。当样品注射到离心圆盘中后，颗粒在离心力作用下沿旋转半径方向开始沉降，在沉降过程中颗粒按由大到小的顺序依次通过检测区。在测试开始阶段检测区附近颗粒的浓度逐渐升高，测试曲线也呈逐渐上升的趋势；随着测试时间的推移，大部分颗粒通过了检测区到达离心圆盘的底部，离心圆盘中的悬浮液浓度逐渐降低，测试曲线也随之逐渐降低，直到测试结束。

在图 1-9 中，测试曲线坐标的横轴为时间轴，纵轴为吸光度轴，为方便判断测试状态特别是方便浓度控制，系统把测试曲线坐标平面分为 3 个区，分别为初始区、过渡区和结束区。

测试曲线在返回初始区后，如果在结束前较长时间呈近似水平状态，说明绝大部分颗粒早已通过检测点沉降到样品池的底部，后面一段时间的测试并没有多少意义。在这种情况下再测试该样品时要把“测试下限”增大一点以减少测试时间。不过，这种情况只是延长测试时间，对测试结果并无不良影响。

当测试曲线达到坐标最右端时，测试就结束了。