

分析仪器使用与维护丛书

# 物性分析仪器

李玉忠 主编



化学工业出版社

化学与应用化学出版中心

分析仪器使用与维护丛书

# 物 性 分 析 仪 器

李玉忠 主编



化学工业出版社  
化学与应用化学出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

物性分析仪器/李玉忠主编. —北京:化学工业出版社, 2005. 5

(分析仪器使用与维护丛书)

ISBN 7-5025-6931-6

I. 物… II. 李… III. 物理性质-分析仪器  
IV. TH83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 040029 号

---

分析仪器使用与维护丛书

**物性分析仪器**

李玉忠 主编

责任编辑: 杜进祥

文字编辑: 李姿娇

责任校对: 陈 静 战河红

封面设计: 郑小红

\*

化学工业出版社 出版发行

化学与应用化学出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 25 字数 485 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6931-6

定 价: 45.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 分析仪器使用与维护丛书

邓 勃 主编

## 各分册主要编写人员

|               |     |     |     |
|---------------|-----|-----|-----|
| 《分析仪器与仪器分析概论》 | 邓 勃 | 王庚辰 | 汪正范 |
| 《电化学分析仪器》     | 朱果逸 |     |     |
| 《傅里叶变换红外光谱仪》  | 翁诗甫 |     |     |
| 《近红外光谱仪器》     | 袁洪福 | 陆婉珍 |     |
| 《离子色谱仪器》      | 朱 岩 | 王少明 |     |
| 《气相色谱仪器系统》    | 武 杰 | 庞增义 |     |
| 《高效液相色谱仪器系统》  | 李 彤 | 张庆合 | 张维冰 |
| 《热分析仪器》       | 刘振海 | 徐国华 | 张洪林 |
| 《生化分析仪器》      | 敬 华 |     |     |
| 《物性分析仪器》      | 李玉忠 |     |     |
| 《样品前处理仪器与装置》  | 李攻科 | 胡玉玲 |     |
| 《有机元素分析仪器》    | 杨德凤 |     |     |
| 《原子吸收光谱仪》     | 章诒学 | 何华焜 | 陈江韩 |
| 《紫外可见分光光度计》   | 李昌厚 |     |     |
| 《X 射线荧光光谱仪》   | 罗立强 | 李国会 |     |

## 内 容 提 要

本书是《分析仪器使用与维护丛书》之一。

物性分析仪器是分析仪器领域动态发展的一个分支,其显著特点是仪器门类众多,测量方法和工作原理各异,适用范围非常广泛。

本书由十多位不同专业领域的专家学者联合编写,全面系统地介绍了当代物性分析仪器领域的基本知识、基本方法及最新成果。全书共7章,内容包括水分仪器、湿度仪器、黏度与流变性仪器、密度仪器、粒度仪器、浊度仪器及石油物性分析仪器。

本书内容丰富,资料翔实,方法先进,实用性强;既可供从事物性分析的相关科技人员阅读参考,又可作为高等院校有关专业师生的教学参考书。

## 序 (一)

科学技术发展的历史表明,科学仪器对认识自然界的规律,促进生产技术的进步和革命,起着非常重要的作用。科学仪器水平直接反映了一个国家科学技术和工业发展水平。世界发达国家都将科学仪器作为信息产业源头,列入新兴产业范畴,把发展科学仪器工业作为提高整个社会劳动生产力和社会效益的强有力的支柱。所以发展科学仪器对我国科技进步和经济、社会发展具有极为重要的战略意义。

分析仪器是科学仪器的重要组成部分。当前,分析仪器的仪器拥有量增加很快,据统计,2002年分析仪器全球销售额比2000年增长了23%。我国分析仪器进口额,2002年比2000年增长了78%。分析仪器的应用范围也越来越广,特别在营养与食品安全、药物与代谢产物、生态环境、材料科学、石化与油田化学、公共卫生等直接关系到人类生存和发展的各学科和领域的应用,更受到普遍的关注。同时,由于新原理、新技术、新材料和新工艺的广泛采用,分析仪器得到了日新月异的发展。仪器的小型化、微型化、智能化发展十分迅速;为适应过程分析要求,各种实时、非侵入式在线分析仪器得到快速发展,科学仪器也正从通用型转向专用型;各种新技术、新方法的广泛应用,使仪器灵敏度更高、分析速度更快、适用范围更广;仪器可靠性和自动化程度不断提高,仪器的操作更为简便。因此,加强分析仪器知识的继续教育,对分析仪器研究、开发、生产、使用者,乃至一切关心我国分析仪器发展的同志都是一个极为重要的问题。

为此目的,经化学工业出版社提议,中国仪器仪表学会分析仪器学会组织编写了《分析仪器使用与维护丛书》。这套丛书以“简明实用、选材新颖、特色鲜明、通俗易懂”为主导思想,着重介绍分析仪器结构、原理、应用领域,也扼要介绍仪器的使用方法、维护要点、故障处理与校正,力图反映分析仪器领域的基本知识、基本方法以及最新成果。这套丛书由长期从事仪器分析或分析仪器实际工作的专家撰写,其完整性、实用性非常突出,不失为从事和关心仪器分析的人员更好地了解和掌握分析仪器及其使用和维护保养知识的专业参考书。

中国仪器仪表学会分析仪器学会

王顺昌理事长

2004年10月

## 序 (二)

现代科技和产业的发展,促进了分析测试仪器的迅猛发展和推广应用。当今发展最快的科技领域如生命科学、生物工程、环境科学和生态保护、现代医学和中医药物、纳米科技等领域的基础研究和应用工作,都离不开各种类型的分析测试仪器,分析仪器已成为最基础的设备之一,其对国民经济的重要作用是其任何方法与手段所无法替代的。

分析测试是科技与生产的眼睛,是衡量一个国家经济与科技发展水平的主要标志。随着我国科学技术的飞速发展,分析仪器的应用领域越来越广阔,越来越深入,从事分析仪器使用和管理工作的人员也在迅速增多。为了适应这一形势的需要,化学工业出版社与中国仪器仪表学会分析仪器学会组织编写了《分析仪器使用与维护丛书》,以帮助有关科技人员了解和掌握分析仪器的使用和维护保养,提高仪器使用效率与使用寿命。

这套丛书贯穿了“简明实用、选材新颖、特色鲜明、通俗易懂”的主导思想。不仅对于不同分析仪器的基本知识和基本方法扼要介绍,也重点对不同类型、用途分析仪器的使用方法、维护要点、故障处理与校正等作了较为详尽的介绍,为广大分析工作者提供了一套实用、便捷的案头书。

这套丛书的所有执笔者皆为长期从事仪器分析或分析仪器实际工作的专家学者,也有在第一线工作的年轻人。他们欲通过这套丛书把自己的经验与大家分享,因此当作者提出请我为《分析仪器使用与维护丛书》做序时便欣然应允。我真切地希望广大分析工作者可以通过这套书能更好地掌握和利用分析仪器,为各领域科研与生产,为提高国民经济总体目标服务。

张祖安 2004.10.29

# 前 言

物性分析仪器是检测物质某些物理特性的一类仪器。

这里所说的“物质”，是指可以局限于某一范围内的固体、液体和气体，而非泛指独立存在于人们意识之外的客观实在。这里所说的“物性”，是指可以用物理量来定量描述和用仪器来定量检测的那些物质特性，而非泛指物质的所有特性。

可用于定量描述和检测的物性主要有水分、湿度、黏度与流变性、密度、粒度、浊度和石油产品的馏程、蒸气压、闪点、倾点、浊点、辛烷值等。

由于检测这些物性的仪器都是按其检测参量来命名的，所以物性分析仪器不按检测原理而按检测参量来分类。例如，检测水分的仪器叫作水分计或水分仪，检测湿度的仪器叫作湿度计。本书按此分类原则在前面几章分别介绍水分仪器、湿度仪器、黏度与流变性仪器、密度仪器、粒度仪器和浊度仪器，最后一章介绍石油物性分析仪器。最后一章之所以不像前几章那样按被测参量分章介绍而归为一章，是鉴于这类仪器的专用性与多样性。

关于粒度仪器，在所见的有关物性分析技术与仪器的现有著述中都未列入。固体颗粒的粒度及其分布是粉体材料的重要物理特性，它关系到粉体材料及其制品的应用性能。随着国内外粉体工业的蓬勃发展，对粒度测试仪器的需求急剧上升。粒度分析技术和仪器在 20 世纪七八十年代获得了迅速的发展，先后出现了多种粒度测量方法和众多相关仪器。为适应我国粉体工业发展的形势和需要，本书首次将粒度仪器作为一章予以介绍。

物性分析仪器的显著特点之一就是仪器门类众多，每类仪器所采用的测量方法和工作原理又多种多样，研发制造会涉及诸多学科与技术领域，因而又自然地逐步形成了许多小的专业性很强的研发制造和检测应用分支。据此特点，本书在编写中邀请了在不同专业领域长期从事教学、研发、测试和应用的十几位作者分工合作，共同完成。

全书结构由李玉忠确定。绪论由李玉忠编写。第 1 章由多位作者编写，其中李占元编写重量法水分计，易洪编写卡尔·费休水分仪，单成祥与田广军编写电阻式水分计，张邦宏编写电容式水分计，王子成编写近红外水分仪，刘圣康编写中子水分计，李玉忠编写微波水分计。第 2 章由范金鹏与权学理编写。第 3 章由李鸿英和张劲军编写。第 4 章由李兴华编写。第 5 章由胡荣泽编写。第 6 章由张文阁编写。第 7 章由蔺玉贵编写。全书由李玉忠统稿。

物性分析仪器是分析仪器领域动态发展的一个分支。本书力图全面反映当代物性分析仪器领域的基本知识、基本方法及最新成果。所介绍的仪器中有不

少为 20 世纪 90 年代出现的仪器，最新的为 2002 年上市的仪器。希望能给从事物性分析的相关科技人员提供较完整的一本学习参考书，也为大专院校有关专业的师生提供一本实用的教学参考书。

本书在编写过程中参阅了大量中外文参考书籍和文献资料，主要参考文献列在每章的末尾。在此谨对国内外有关作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中如有不妥之处，恭请读者批评指正。

**编者**

**2005 年 3 月**

# 目 录

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 绪论 .....                       | 1  |
| 第1章 水分仪器 .....                 | 3  |
| 1.1 水分测量的基本概念 .....            | 3  |
| 1.2 重量法水分计 .....               | 5  |
| 1.2.1 重量法水分计的基本原理和仪器类型 .....   | 5  |
| 1.2.2 烘箱法 .....                | 5  |
| 1.2.3 热天平法 .....               | 6  |
| 1.2.4 干燥剂法 .....               | 8  |
| 1.2.5 样品的制备与预处理 .....          | 9  |
| 1.3 卡尔·费休水分仪 .....             | 9  |
| 1.3.1 卡尔·费休滴定法的原理和分类 .....     | 9  |
| 1.3.2 卡尔·费休试剂 .....            | 10 |
| 1.3.3 仪器的基本结构和原理 .....         | 13 |
| 1.3.3.1 卡尔·费休容量法滴定仪 .....      | 13 |
| 1.3.3.2 卡尔·费休库仑法滴定仪 .....      | 14 |
| 1.3.4 卡尔·费休水分仪的性能指标及检测方法 ..... | 16 |
| 1.3.5 卡尔·费休水分仪的使用注意事项 .....    | 18 |
| 1.3.5.1 环境湿度 .....             | 18 |
| 1.3.5.2 填充电解液 .....            | 18 |
| 1.3.5.3 取样 .....               | 18 |
| 1.3.5.4 样品量 .....              | 19 |
| 1.3.5.5 影响测量结果的其他因素 .....      | 19 |
| 1.3.5.6 及时更换电解液 .....          | 19 |
| 1.3.5.7 清洁滴定池和电解电极 .....       | 20 |
| 1.4 电阻式水分计 .....               | 20 |
| 1.4.1 测量原理及其数学模型 .....         | 20 |
| 1.4.1.1 一般原理、特点及应用领域 .....     | 20 |
| 1.4.1.2 传统测量原理 .....           | 21 |
| 1.4.1.3 高精度测量原理 .....          | 22 |
| 1.4.1.4 高精度测量采用的实用数学模型 .....   | 22 |
| 1.4.2 仪器系统组成框图及各组成部分的作用 .....  | 24 |

|         |                  |    |
|---------|------------------|----|
| 1.4.2.1 | 传统电阻式水分计         | 24 |
| 1.4.2.2 | 智能化电阻式水分计        | 24 |
| 1.4.3   | 电阻式水分传感器         | 25 |
| 1.4.3.1 | 杯状电阻式水分传感器       | 25 |
| 1.4.3.2 | 探针电阻式水分传感器       | 26 |
| 1.4.3.3 | 平板电阻式水分传感器       | 26 |
| 1.4.3.4 | 滚轮电阻式水分传感器       | 26 |
| 1.4.4   | 电阻式水分计的常用测量电路    | 26 |
| 1.4.4.1 | 线性灵敏的不平衡电桥       | 26 |
| 1.4.4.2 | 晶体管电路            | 26 |
| 1.4.4.3 | 高精度大量程运算放大器电路    | 27 |
| 1.4.5   | 智能化电阻式水分计的数据处理技术 | 28 |
| 1.4.6   | 测量准确度            | 28 |
| 1.4.6.1 | 电阻式水分计的准确度水平     | 28 |
| 1.4.6.2 | 影响准确度的因素及其克服办法   | 28 |
| 1.4.7   | 仪器的使用与维护         | 30 |
| 1.4.7.1 | 使用的一般方法及注意事项     | 30 |
| 1.4.7.2 | 常见故障及处理          | 30 |
| 1.5     | 电容式水分计           | 31 |
| 1.5.1   | 测量原理             | 31 |
| 1.5.1.1 | 一般原理、特点及应用领域     | 31 |
| 1.5.1.2 | 原理结构框图及各部分的作用    | 31 |
| 1.5.2   | 电容式水分传感器         | 32 |
| 1.5.2.1 | 一种介质的电容式水分传感器    | 32 |
| 1.5.2.2 | 两种介质的并联电容式水分传感器  | 33 |
| 1.5.2.3 | 物料的介电性能对传感电容的影响  | 35 |
| 1.5.3   | 常用测量电路           | 35 |
| 1.5.3.1 | 阻抗电桥测量放大电路       | 35 |
| 1.5.3.2 | 差拍测量电路           | 38 |
| 1.5.3.3 | 高频谐振测量电路         | 38 |
| 1.5.3.4 | 复阻抗分离测量电路        | 40 |
| 1.5.4   | 单片机测量电路          | 41 |
| 1.5.4.1 | 单片机测量系统的组成       | 42 |
| 1.5.4.2 | 输入通道的参量变换器接口电路   | 43 |
| 1.5.4.3 | 输出通道的显示器接口       | 43 |
| 1.5.5   | 电容式水分计的遥测技术      | 44 |
| 1.5.6   | 电容式水分计的标定        | 46 |
| 1.5.7   | 仪器的使用与维护         | 46 |
| 1.5.7.1 | 使用的一般方法及注意事项     | 46 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 1.5.7.2 常见故障及处理           | 47 |
| 1.6 近红外水分仪                | 47 |
| 1.6.1 测量原理                | 47 |
| 1.6.2 仪器的分类和应用场合          | 48 |
| 1.6.3 透射式近红外水分仪           | 49 |
| 1.6.3.1 一次透过式水分仪          | 49 |
| 1.6.3.2 多次透过式水分仪          | 50 |
| 1.6.3.3 球面聚光式水分仪          | 50 |
| 1.6.3.4 三种透射式水分仪的对比       | 50 |
| 1.6.4 反射式近红外水分仪           | 51 |
| 1.6.4.1 单光路双光束近红外水分仪      | 51 |
| 1.6.4.2 双光路四光束近红外水分仪      | 51 |
| 1.6.4.3 三波长近红外水分仪         | 52 |
| 1.6.5 近红外水分测量系统           | 53 |
| 1.6.6 近红外水分仪的标定与校准        | 53 |
| 1.6.7 近红外水分仪的使用与维护        | 54 |
| 1.7 中子水分计                 | 55 |
| 1.7.1 中子水分测定法的基本原理和仪器类型   | 55 |
| 1.7.1.1 按测量方式分类           | 55 |
| 1.7.1.2 按测量原理分类           | 56 |
| 1.7.1.3 按装置类型分类           | 56 |
| 1.7.2 固定式中子水分计            | 57 |
| 1.7.2.1 固定式插入型中子水分计       | 57 |
| 1.7.2.2 固定式表面型中子水分计       | 58 |
| 1.7.2.3 固定式透射型中子水分密度计     | 59 |
| 1.7.3 移动式中子水分计            | 59 |
| 1.7.3.1 移动式插入型中子水分计       | 59 |
| 1.7.3.2 移动式表面型水分密度计       | 59 |
| 1.7.4 取样式中子水分计            | 60 |
| 1.7.4.1 取样式透射型热中子水分计      | 60 |
| 1.7.4.2 取样式透射型快中子水分计      | 61 |
| 1.7.4.3 取样式散射型热中子水分计      | 61 |
| 1.7.5 中子源和 $\gamma$ 源及其防护 | 62 |
| 1.7.5.1 中子源和 $\gamma$ 源   | 62 |
| 1.7.5.2 辐射防护简介            | 62 |
| 1.7.5.3 中子源的防护及屏蔽         | 63 |
| 1.7.5.4 $\gamma$ 射线的屏蔽    | 63 |
| 1.7.6 核探测器                | 63 |
| 1.7.7 典型中子水分计的保养与维护       | 63 |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 1.8 微波水分计                        | 64        |
| 1.8.1 微波水分测量原理                   | 64        |
| 1.8.1.1 什么是微波                    | 64        |
| 1.8.1.2 微波频率下水和其他物质的介电特性         | 64        |
| 1.8.1.3 微波传输特性与湿物质介电常数的关系        | 65        |
| 1.8.1.4 其他变量对微波传输特性的影响及其解决办法     | 67        |
| 1.8.2 微波水分测量的主要特点和应用领域           | 67        |
| 1.8.3 微波水分传感器                    | 68        |
| 1.8.3.1 自由空间型传感器                 | 68        |
| 1.8.3.2 传输线型传感器                  | 69        |
| 1.8.3.3 反射型传感器                   | 69        |
| 1.8.3.4 谐振器型传感器                  | 70        |
| 1.8.3.5 时域反射法型传感器                | 70        |
| 1.8.4 微波水分测量电路                   | 71        |
| 1.8.4.1 衰减测量电路                   | 71        |
| 1.8.4.2 相移测量电路                   | 71        |
| 1.8.4.3 衰减和相移测量电路                | 71        |
| 1.8.4.4 谐振频率测量电路                 | 72        |
| 1.8.5 微波水分计与在线微波水分测量系统           | 72        |
| 1.8.5.1 新鲜天然橡胶乳液微波水分计            | 73        |
| 1.8.5.2 绿茶生产微波水分测量系统             | 74        |
| 1.8.5.3 碎木板生产微波水分测量系统            | 76        |
| 1.8.5.4 时域反射法水分计                 | 76        |
| 参考文献                             | 78        |
| <b>第2章 湿度仪器</b>                  | <b>80</b> |
| 2.1 湿度测量的基本概念                    | 80        |
| 2.1.1 水及水汽的性质                    | 80        |
| 2.1.1.1 关于平衡和饱和的概念               | 80        |
| 2.1.1.2 汽化和蒸发                    | 81        |
| 2.1.2 饱和水汽压公式                    | 82        |
| 2.1.2.1 Wexler-Greenspan 饱和水汽压公式 | 82        |
| 2.1.2.2 饱和水汽压的简化公式               | 83        |
| 2.1.3 增加系数 $f$                   | 83        |
| 2.1.4 湿度的表示方法                    | 84        |
| 2.1.4.1 混合比                      | 84        |
| 2.1.4.2 比湿                       | 85        |
| 2.1.4.3 相对湿度                     | 86        |
| 2.1.4.4 露点(霜点)                   | 87        |

|         |                       |     |
|---------|-----------------------|-----|
| 2.1.5   | 常用湿度单位的换算             | 87  |
| 2.1.6   | 湿度仪器的分类               | 88  |
| 2.2     | 干湿球湿度计                | 89  |
| 2.2.1   | 干湿球湿度计的理论             | 89  |
| 2.2.1.1 | 基本原理                  | 89  |
| 2.2.1.2 | 影响湿球温度的因素             | 90  |
| 2.2.2   | 各种干湿球湿度计              | 91  |
| 2.2.2.1 | 玻璃水银温度计干湿表            | 92  |
| 2.2.2.2 | 使用电测温元件的干湿球湿度计        | 93  |
| 2.2.3   | 干湿表使用的注意事项            | 94  |
| 2.3     | 冷凝露点湿度计               | 94  |
| 2.3.1   | 露点湿度计的原理              | 95  |
| 2.3.2   | 露点的研究                 | 96  |
| 2.3.3   | 普通冷镜露点仪               | 97  |
| 2.3.4   | 循环式冷凝湿度计              | 97  |
| 2.3.5   | 低霜点冷镜露点仪              | 98  |
| 2.3.6   | 声表面波露点湿度计             | 100 |
| 2.4     | 氯化锂露点湿度计              | 101 |
| 2.5     | 电阻式湿度计                | 105 |
| 2.5.1   | 氯化锂湿度计                | 105 |
| 2.5.2   | 陶瓷湿度传感器               | 107 |
| 2.5.2.1 | 陶瓷湿度传感器的工作原理          | 108 |
| 2.5.2.2 | 陶瓷湿度传感器的结构            | 108 |
| 2.5.2.3 | 陶瓷湿度传感器的主要特性          | 109 |
| 2.5.3   | 高分子电阻式湿度传感器           | 109 |
| 2.6     | 电容式湿度计                | 110 |
| 2.6.1   | 高分子聚合物电容式湿度计          | 110 |
| 2.6.1.1 | 湿敏材料的感湿机理             | 111 |
| 2.6.1.2 | 湿敏材料的设计               | 111 |
| 2.6.1.3 | 湿敏元件的上电极和下电极          | 111 |
| 2.6.1.4 | 湿敏元件的上保护层             | 112 |
| 2.6.1.5 | 电容式湿敏元件的调理电路和仪器设计     | 113 |
| 2.6.1.6 | 电容湿敏元件的电容-湿度特性回归和温度补偿 | 113 |
| 2.6.2   | 氧化铝湿度计                | 114 |
| 2.6.2.1 | 基本原理                  | 114 |
| 2.6.2.2 | 氧化铝湿度传感器的结构和阳极氧化工艺    | 115 |
| 2.6.2.3 | 氧化铝湿度传感器的一些主要特性       | 116 |
| 2.7     | 涂膜压电和声表面波晶体湿度计        | 118 |
| 2.7.1   | 涂膜压电吸收湿度分析仪           | 118 |

|                      |                          |     |
|----------------------|--------------------------|-----|
| 2.7.1.1              | 石英检测器晶体 .....            | 118 |
| 2.7.1.2              | 石英检测器的工作原理 .....         | 118 |
| 2.7.1.3              | 石英检测器的结构 .....           | 119 |
| 2.7.2                | 声表面波晶体湿度传感器 .....        | 120 |
| 2.7.2.1              | 声表面波晶体湿度传感器的原理和结构 .....  | 120 |
| 2.7.2.2              | SAW 晶体湿度传感器的几个主要问题 ..... | 121 |
| 2.8                  | 电解湿度计 .....              | 123 |
| 2.8.1                | 概述 .....                 | 123 |
| 2.8.2                | 电解湿度计的工作原理和仪器结构 .....    | 123 |
| 2.8.3                | 电解池 .....                | 125 |
| 2.8.3.1              | 电解池的结构 .....             | 125 |
| 2.8.3.2              | 电解池的清洗工艺 .....           | 125 |
| 2.8.3.3              | 电解池的涂膜工艺 .....           | 125 |
| 2.8.3.4              | 电解池的活化和储存 .....          | 126 |
| 2.8.4                | 电解湿度计的使用 .....           | 126 |
| 2.9                  | 光谱吸收湿度计 .....            | 126 |
| 2.9.1                | 红外吸收湿度计 .....            | 126 |
| 2.9.1.1              | 基本原理 .....               | 126 |
| 2.9.1.2              | 仪器的基本组成 .....            | 128 |
| 2.9.1.3              | 标定与压力对测量的影响 .....        | 129 |
| 2.9.1.4              | 小结 .....                 | 130 |
| 2.9.2                | 紫外吸收湿度计 .....            | 130 |
| 2.9.2.1              | 原理 .....                 | 131 |
| 2.9.2.2              | 组成和结构 .....              | 131 |
| 2.9.2.3              | 仪器的标定和检测 .....           | 133 |
| 2.9.3                | 光纤湿度分析仪 .....            | 133 |
| 2.9.3.1              | 光纤湿度传感器的工作原理 .....       | 133 |
| 2.9.3.2              | 光纤湿度传感器的性能 .....         | 133 |
| 2.10                 | 湿度标准和湿度计的校准 .....        | 135 |
| 2.10.1               | 重量法 .....                | 135 |
| 2.10.2               | 湿度发生器 .....              | 136 |
| 2.10.2.1             | 双压法湿度发生器 .....           | 137 |
| 2.10.2.2             | 双温法湿度发生器 .....           | 140 |
| 2.10.3               | 饱和盐固定湿度点法 .....          | 142 |
| 2.10.4               | 湿度仪器的检定 .....            | 144 |
| 2.10.4.1             | 湿度计量标准的传递系统 .....        | 144 |
| 2.10.4.2             | 湿度计的检定周期 .....           | 145 |
| 参考文献 .....           |                          | 146 |
| 附录 2.1 饱和水蒸气压表 ..... |                          | 146 |

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| 表 1 水的饱和蒸气压 ( $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ ) .....        | 146        |
| 表 2 过冷水的饱和蒸气压 ( $0\sim -50^{\circ}\text{C}$ ) .....      | 148        |
| 表 3 冰的饱和蒸气压 ( $0\sim -100^{\circ}\text{C}$ ) .....       | 150        |
| 附录 2.2 露点与其他主要湿度单位换算表 .....                              | 153        |
| 表 1 露点与其他主要湿度单位换算表 ( $0\sim 80^{\circ}\text{C}$ ) .....  | 153        |
| 表 2 露点与其他主要湿度单位换算表 ( $0\sim -75^{\circ}\text{C}$ ) ..... | 155        |
| <b>第 3 章 黏度与流变性仪器</b> .....                              | <b>157</b> |
| 3.1 黏度与流变性测量的基本概念 .....                                  | 157        |
| 3.1.1 黏度的定义与物理意义 .....                                   | 157        |
| 3.1.2 非牛顿流体及其流变性质 .....                                  | 158        |
| 3.1.2.1 非牛顿流体的概念及表观黏度 .....                              | 158        |
| 3.1.2.2 非牛顿流体的分类 .....                                   | 159        |
| 3.1.2.3 黏弹性体 .....                                       | 159        |
| 3.1.2.4 非牛顿流体流变性的时间相关性 .....                             | 161        |
| 3.1.3 黏度与流变性测量方法和仪器概述 .....                              | 162        |
| 3.1.3.1 黏度与流变性测量的目的及途径 .....                             | 162        |
| 3.1.3.2 黏度与流变性测量方法概述 .....                               | 162        |
| 3.2 同轴圆筒黏度计及流变仪 .....                                    | 165        |
| 3.2.1 测量原理 .....                                         | 165        |
| 3.2.2 牛顿流体黏度的测量 .....                                    | 165        |
| 3.2.2.1 普通同轴圆筒结构 .....                                   | 165        |
| 3.2.2.2 双间隙圆筒结构 .....                                    | 166        |
| 3.2.3 非牛顿流体表观黏度与流变性的测量 .....                             | 166        |
| 3.2.3.1 已知流变方程 .....                                     | 166        |
| 3.2.3.2 未知流变方程 .....                                     | 167        |
| 3.2.3.3 普适性 .....                                        | 169        |
| 3.2.4 影响测量准确性的主要因素 .....                                 | 170        |
| 3.2.4.1 末端效应 .....                                       | 170        |
| 3.2.4.2 偏心 .....                                         | 172        |
| 3.2.4.3 黏性发热 .....                                       | 172        |
| 3.2.4.4 二次流与湍流 .....                                     | 172        |
| 3.2.4.5 壁面滑移 .....                                       | 172        |
| 3.2.4.6 试液与环境的温差 .....                                   | 173        |
| 3.2.4.7 仪器热膨胀 .....                                      | 173        |
| 3.2.4.8 试液的热胀冷缩 .....                                    | 173        |
| 3.2.4.9 转速变化 .....                                       | 173        |
| 3.2.4.10 仪器测量轴的自身摩擦 .....                                | 173        |
| 3.2.5 仪器的典型结构 .....                                      | 174        |

|         |                           |     |
|---------|---------------------------|-----|
| 3.2.5.1 | 探测系统 .....                | 174 |
| 3.2.5.2 | 力矩系统与测矩系统 .....           | 174 |
| 3.2.5.3 | 驱动与测速系统 .....             | 176 |
| 3.2.5.4 | 定位系统 .....                | 177 |
| 3.2.5.5 | 恒温系统 .....                | 177 |
| 3.3     | 毛细管黏度计及流变仪 .....          | 178 |
| 3.3.1   | 测量原理 .....                | 178 |
| 3.3.1.1 | 哈根-泊肃叶定律及牛顿流体黏度测定原理 ..... | 178 |
| 3.3.1.2 | 非牛顿流体流变性的测量原理 .....       | 178 |
| 3.3.2   | 影响测量准确性的主要因素 .....        | 181 |
| 3.3.2.1 | 动能修正 .....                | 181 |
| 3.3.2.2 | 末端修正 .....                | 181 |
| 3.3.2.3 | 湍流、滑移及其他 .....            | 182 |
| 3.3.3   | 牛顿流体黏度的测定 .....           | 182 |
| 3.3.3.1 | 绝对测量 .....                | 182 |
| 3.3.3.2 | 相对测量 .....                | 182 |
| 3.3.4   | 毛细管黏度计/流变仪的典型结构 .....     | 183 |
| 3.3.4.1 | 用于牛顿流体黏度测量的毛细管黏度计 .....   | 183 |
| 3.3.4.2 | 用于非牛顿流体流变性测量的毛细管流变仪 ..... | 184 |
| 3.4     | 其他常用黏度及流变性测量方法及仪器 .....   | 185 |
| 3.4.1   | 旋转法 .....                 | 185 |
| 3.4.1.1 | 锥-板式黏度计 .....             | 185 |
| 3.4.1.2 | 平行板式黏度计 .....             | 186 |
| 3.4.2   | 落体式 .....                 | 186 |
| 3.4.2.1 | 落球式黏度计 .....              | 186 |
| 3.4.2.2 | 落柱式黏度计 .....              | 190 |
| 3.4.2.3 | 气泡黏度计 .....               | 194 |
| 3.4.3   | 振动式 .....                 | 195 |
| 3.4.3.1 | 扭转振动黏度计 .....             | 195 |
| 3.4.3.2 | 振动片式黏度计 .....             | 197 |
| 3.4.3.3 | 振球式黏度计 .....              | 197 |
| 3.4.4   | 平板法 .....                 | 198 |
| 3.4.4.1 | 滑板式测黏系统 .....             | 198 |
| 3.4.4.2 | 带式测黏系统 .....              | 199 |
| 3.4.4.3 | 压板(横流)式测黏系统 .....         | 199 |
| 3.4.4.4 | 倾斜板式测黏系统 .....            | 200 |
| 3.5     | 高温黏度计 .....               | 200 |
| 3.5.1   | 高温旋转黏度计 .....             | 200 |
| 3.5.1.1 | 原理 .....                  | 200 |