

“十二五”普通高等学校本科规划教材

# 金属材料磨损实验

JINSHU CAILIAO MOSUN SHIYAN

袁兴栋 杨晓洁 主编



化学工业出版社

“十二五”普通高等学校本科规划教材

# 金属材料磨损实验

袁兴栋 杨晓洁 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书简要介绍了材料磨损实验基础知识和实验设备；着重分析了金属材料、高分子材料、润滑油、润滑脂、水泥等材料摩擦系数和磨损量的测定方法、实验的具体过程、实验的注意事项等；介绍了各种国家标准、机械行业和石油化工行业的标准，以及其使用与注意事项，帮助学生规范实验方案、实验过程、实验方法。本书可供从事表面工程专业、机械制造等科研人员、高等院校相关专业的研究人员和师生参考和阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料磨损实验/袁兴栋, 杨晓洁主编. —北京:  
化学工业出版社, 2015. 5  
“十二五”普通高等学校本科规划教材  
ISBN 978-7-122-23108-6

I. ①金… II. ①袁…②杨… III. ①金属材料-磨  
损试验 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 038352 号

---

责任编辑: 杨 菁

文字编辑: 余纪军

责任校对: 边 涛

装帧设计: 刘丽华

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 432 千字 2015 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

材料表面科学是材料科学研究中一门综合边缘科学,随着材料表面处理工艺和材料表面分析技术的飞速发展,材料表面科学逐渐成为基础科学和应用技术方面的重要研究领域。材料磨损科学研究是材料表面科学研究的重要方向,近几年受到国内外专家学者的广泛关注,尤其是航空领域、电子信息领域的材料磨损研究问题。

据统计,全世界有  $1/3 \sim 1/2$  的能源以各种形式消耗在摩擦上,而摩擦造成的磨损是机械设备失效的主要原因,大约有 80% 的损伤零件是由于各种形式的磨损引起的。为适应二十一世纪高等学校教学改革,更好地培养表面工程方面的人才,全面提高学生的独立科学实验和分析实验问题的能力,现着手编写了这本《金属材料磨损实验》。

《金属材料磨损实验》是在多年的实践理论和实验教学的基础上,参考国内外有关材料摩擦磨损方面的教材编写的,主要针对表面工程专业、机械制造等专业使用,也可以作为材料表面工程技术人员分析参考书。本教材分为三个部分,第一部分为实验基础知识和实验设备,着重介绍了材料磨损实验的基础知识,SEM、M-2000 摩擦磨损试验机、高温摩擦磨损试验机等各种实验设备的构造、使用方法、实验中现象的观察以及实验数据的科学处理,用以帮助学生提高观察实验现象的能力、独立完成整个实验内容的能力、独立科学处理实验数据的能力;第二部分为实验内容,共 28 个实验内容,本部分着重介绍了金属材料、高分子材料、润滑油、润滑脂、水泥等材料摩擦系数和磨损量的测定方法、实验的具体过程、实验的注意事项等,帮助学生尤其是表面工程技术人员掌握材料摩擦系数和磨损量测定的基本知识,并严格按照国家、机械行业的标准操作每一个实验;第三部分为附录,介绍各种国家标准、机械行业和石油化工行业的标准,共 22 个,着重介绍了这些标准的使用及注意事项,帮助学生规范实验方案、实验过程、实验方法,按照科学的实验方法完成各种实验,并按照标准科学的处理实验数据。

本书由山东建筑大学袁兴栋老师(全书统稿)和山东省产品质量检验研究院杨晓洁高级工程师(主要完成第二部分实验十三至实验二十一、第三部分附录 5 至附录 9、附录 15、附录 19)任主编。在编写的过程中,得到了山东建筑大学材料学院王坤、侯宗超、安清伟、陶雪、戚清丽、王立娟等的帮助,在此表示最真诚的感谢。同时借此书出版之机,谨向鼓励、关心和支持本书出版的同仁和工作人员表示衷心的感谢。

由于材料科学技术尤其是材料摩擦磨损科学的研究及抗磨损技术的飞速发展,加之笔者水平有限,虽经一再校阅,书中可能仍有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2014 年 10 月

# 目 录

## 第一部分 实验基础知识和实验设备

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>1 绪论</b>            | 1  |
| 1.1 课程的教学目标            | 1  |
| 1.2 课程的教学方法            | 1  |
| 1.3 实验报告的基本格式          | 1  |
| 1.4 磨损实验的常识            | 2  |
| 1.4.1 摩擦磨损实验的分类        | 2  |
| 1.4.2 使用实验             | 2  |
| 1.4.3 实验室实验            | 2  |
| 1.4.4 模拟实验的模拟问题选择      | 3  |
| <b>2 实验设备的使用</b>       | 4  |
| 2.1 光学显微镜              | 4  |
| 2.1.1 概述               | 4  |
| 2.1.2 光学显微镜的构造和基本原理    | 4  |
| 2.1.3 光学显微镜的使用         | 8  |
| 2.2 X射线衍射仪             | 9  |
| 2.2.1 概述               | 9  |
| 2.2.2 X射线衍射仪的构造        | 9  |
| 2.2.3 衍射实验方法           | 13 |
| 2.3 硬度计                | 14 |
| 2.3.1 概述               | 14 |
| 2.3.2 洛氏硬度计的构造         | 15 |
| 2.3.3 洛氏硬度测试法          | 16 |
| 2.4 扫描电子显微镜            | 16 |
| 2.4.1 概述               | 16 |
| 2.4.2 扫描电子显微镜的构造       | 16 |
| 2.4.3 扫描电子显微镜操作规程及要求   | 19 |
| 2.5 X射线光电子能谱仪          | 20 |
| 2.5.1 概述               | 20 |
| 2.5.2 X射线光电子能谱仪工作原理和结构 | 21 |
| 2.5.3 X射线光电子能谱仪特点      | 21 |
| 2.6 M-2000 摩擦磨损试验机     | 22 |
| 2.6.1 试验机的构造           | 22 |
| 2.6.2 试验机的操作要求         | 25 |
| 2.6.3 摩擦系数和摩擦功的测定      | 26 |
| 2.6.4 耐磨性的评定           | 28 |

2.7 动载磨料磨损试验机 ..... 28

2.7.1 试验机构造 ..... 28

2.7.2 试验机操作要求 ..... 30

2.7.3 耐磨性评定 ..... 32

2.8 高温摩擦磨损试验机 ..... 33

2.8.1 试验机构造 ..... 33

2.8.2 试验机操作方法 ..... 35

2.8.3 摩擦系数和磨损量测定 ..... 36

2.9 盘销式摩擦磨损试验机 ..... 36

2.9.1 试验机构造 ..... 36

2.9.2 试验机操作方法 ..... 39

2.9.3 摩擦系数和磨损量测定 ..... 41

2.10 万能摩擦磨损试验机 ..... 41

2.10.1 试验机构造 ..... 41

2.10.2 试验机操作方法 ..... 45

2.10.3 试验机维护 ..... 47

第二部分 实验内容

实验一 低中碳钢表面硼铬稀土低温共渗层摩擦磨损实验 ..... 48

实验二 GCr15 钢在 M-2000 试验机上的滚动摩擦实验 ..... 53

实验三 GCr15 钢在 MRH-3 试验机上的滑动摩擦实验 ..... 56

实验四 高速工具钢涂层摩擦磨损实验 ..... 59

实验五 45 钢和铜摩擦磨损实验 ..... 61

实验六 镀膜件的摩擦磨损实验 ..... 64

实验七 刀具角度测量及刀具磨损实验 ..... 66

实验八 润滑脂（陶瓷或轴承）摩擦磨损实验 ..... 68

实验九 氧化铝陶瓷摩擦磨损实验 ..... 70

实验十 聚四氟乙烯涂层（石墨/二硫化钼涂层）摩擦磨损实验 ..... 72

实验十一 聚四氟乙烯摩擦磨损实验中磨屑的收集和观察 ..... 75

实验十二 液体的界面性能测量 ..... 77

实验十三 润滑剂理化性能的测定 ..... 80

实验十四 润滑剂的摩擦特性测试 ..... 84

实验十五 水泥胶砂耐磨性测定 ..... 87

实验十六 圆环徽粗法摩擦系数的测定 ..... 88

实验十七 摆式仪法测定路面摩擦系数 ..... 91

实验十八 辊轴式纤维摩擦系数测试 ..... 97

实验十九 金属材料试环-试块滑动摩擦磨损试验 ..... 99

实验二十 镜片耐磨性测试 ..... 101

实验二十一 纺织材料耐磨性的测定 ..... 103

实验二十二 高密度钻井液的配制及其泥饼摩擦系数的测定 ..... 105

实验二十三 磁阻尼和动摩擦系数的测定 ..... 109

实验二十四 塑料薄膜摩擦系数的测定 ..... 112

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 实验二十五 | 印刷耐磨性实验 .....            | 114 |
| 实验二十六 | 水泥混凝土耐磨性实验 .....         | 116 |
| 实验二十七 | 圆环压缩法测定金属塑性成形的摩擦系数 ..... | 118 |
| 实验二十八 | 流体在圆直管内流动的摩擦系数测定 .....   | 121 |

### 第三部分 附 录

|       |                 |                              |     |
|-------|-----------------|------------------------------|-----|
| 附录 1  | 中华人民共和国国家标准     | 塑料滑动摩擦磨损试验方法                 | 123 |
| 附录 2  | 中华人民共和国国家标准     | 塑料轴承极限 PV 试验方法               | 127 |
| 附录 3  | 中华人民共和国国家标准     | 塑料滚动磨损试验方法                   | 132 |
| 附录 4  | 中华人民共和国石油化工行业标准 | 液体润滑剂摩擦系数测定法<br>(MM-200 法)   | 140 |
| 附录 5  | 中华人民共和国石油化工行业标准 | 铁路柴油机油高温摩擦磨损性能测定法<br>(青铜-钢法) | 145 |
| 附录 6  | 中华人民共和国石油化工行业标准 | 润滑脂摩擦磨损性能测定法<br>(高频线性振动试验机法) | 149 |
| 附录 7  | 中华人民共和国石油化工行业标准 | 润滑油摩擦系数测定法 (四球法)             | 155 |
| 附录 8  | 中华人民共和国国家标准     | 塑料薄膜和薄片摩擦系数测定方法              | 163 |
| 附录 9  | 中华人民共和国国家标准     | 硬质泡沫塑料滚动磨损试验方法               | 168 |
| 附录 10 | 中华人民共和国国家标准     | 色漆和清漆 耐磨性的测定 旋转橡胶砂轮法         | 170 |
| 附录 11 | 中华人民共和国国家标准     | 试验机 通用技术要求                   | 178 |
| 附录 12 | 中华人民共和国国家标准     | 金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损<br>试验  | 185 |
| 附录 13 | 中华人民共和国机械行业标准   | 松散磨粒磨料磨损试验方法 (橡胶轮法)          | 189 |
| 附录 14 | 中华人民共和国机械行业标准   | 摩擦材料术语                       | 202 |
| 附录 15 | 中华人民共和国机械行业标准   | 湿式烧结金属摩擦材料摩擦性能试验方法           | 211 |
| 附录 16 | 中华人民共和国国家标准     | 实验室仪器和设备质量检验规则               | 215 |
| 附录 17 | 中华人民共和国国家标准     | 涂料耐磨性测定 落砂法                  | 238 |
| 附录 18 | 中华人民共和国机械行业标准   | 干式烧结金属摩擦材料摩擦性能试验方法           | 242 |
| 附录 19 | 中华人民共和国机械行业标准   | 固定磨粒磨料磨损试验 销-砂纸盘滑动<br>磨损法    | 245 |
| 附录 20 | 中华人民共和国机械行业标准   | 环块磨损试验机 技术条件                 | 251 |
| 附录 21 | 中华人民共和国机械行业标准   | 气缸套、活塞环快速模拟磨损试验方法            | 257 |
| 附录 22 | 中华人民共和国机械行业标准   | 湿式烧结金属摩擦材料 摩擦性能试验台<br>试验方法   | 262 |
| 参考文献  |                 |                              | 270 |



# 第一部分 实验基础知识和实验设备

## 1 绪 论

### 1.1 课程的教学目标

科学研究、理论教学、实验教学都是学科发展的重要组成部分。当前中国高校长期存在一种偏向，认为科研与实验教学两者之间不相关。科学研究和实验教学两者是密切关联、相互支撑的。无论是研究型大学，还是研究教学型大学都应重视实验教学环节，这是全面培养高层次人才的必然要求。随着科学技术的发展，表面工程专业受到前所未有的关注，对于其中一个重要的分支，摩擦磨损性能方面的研究被科学工作者高度重视，尤其在航空航天、电子信息、信息功能器件、新材料研发等领域。

摩擦磨损实验教学首先是材料表面与界面课程的有益补充，促进学生深入理解材料表面的一些现象本质，尤其是材料摩擦表面的现象本质，更好的学习材料表面与界面课程；其次材料摩擦磨损实验教学能够提高学生对摩擦磨损试验机的操作能力，熟悉摩擦磨损实验的各种参数以及其测定方法，以便掌握材料摩擦磨损实验的实验方法；最后材料摩擦磨损实验让学生时时观察到摩擦表面所发生的一切现象，例如：磨屑的产生、磨屑的转移、摩擦表面的软化等，提高学生科学处理实验数据的能力，为深入研究摩擦磨损复杂机理打下坚实的科学基础。

材料摩擦磨损实验以材料表面与界面基本原理为依据，主要涉及材料摩擦磨损实验、实验仪器分析和实验的国家标准或行业标准三部分内容。学生通过对本课程的学习，可以提高对材料表面工程专业的科学兴趣，加深对材料摩擦磨损的基础理论、基础知识的理解，较为熟悉材料摩擦磨损实验的基本方法和仪器的基本操作，进一步提高学生独立解决问题、分析问题的能力，培养学生科学严谨的科研精神，对材料表面工程专业的发展奠定坚实的基础。

### 1.2 课程的教学方法

为达到材料摩擦磨损实验教学的目的，除了拥有正确的实验态度，还应有科学的实验方法。主要包括集中理论实验教学、独立完成实验操作、集中实验讨论、独立完成实验报告四个环节。

### 1.3 实验报告的基本格式

学生做完实验后，需独立完成材料摩擦磨损实验报告，并按照老师的要求及时送老师批阅，对实验中不理解的问题，通过查阅相关资料进行逐一解决。具体实验报告格式如下：



学院:

姓名:

班级:

学号:

专业:

实验日期:

### 一、实验目的

建议学生该部分填写本实验用的基本理论和技能, 测量参数的基本方法。

## 二、实验原理

详细介绍实验测量参数的基本原理、实验设备的工作原理以及实验误差。

### 三、实验步骤或方法

严格按照实验设备的基本操作要求做实验，注意对实验后试样的保护，尤其摩擦表面的保护。

#### 四、实验数据处理

详细记录原始实验数据，尽量做到对实验过程中每个原始数据的记录，科学分析处理原始实验数据，并观察实验数据与实验过程中摩擦表面形貌的相关性。

## 五、实验要求

要保持科学严谨的实验态度，听从指挥，多动手，多观察，多分析。

## 六、思考题

做完实验后，要查阅相关资料，深入理解实验过程中所涉及的知识点。

### 1.4 磨损实验的常识

目前摩擦磨损实验总体上都存在实验周期过长、实验现象不明显,试验结果不够明确等缺点,近年来随着摩擦学研究工作的迅速展开,磨损实验技术也相对有了很大的提高。所谓摩擦磨损实验技术包括两个方面:摩擦磨损实验测试装置和摩擦磨损实验方法。

### 1.4.1 摩擦磨损实验的分类

根据实验的条件和任务将摩擦磨损实验分为使用实验和实验室实验，实验室实验又分为一般性模拟实验、模拟性零件实验和台架试验。

### 1.4.2 使用实验

使用实验是在实际运转的现场条件下进行的，有两个目的：一是对实际使用过程中的机器进行检测，了解运行的可靠性和确定必须的检修；二是对新开发的机器设备或一部分零件的耐磨性进行实机实验，以便进行优化。优点：数据资料可靠，真实性强，是最终评定的依据。缺点：实验周期长，需要消耗较大的人力物力，摩擦磨损通常是多因素综合的结果，使用实验中无法有意改变某一个参数而保持其他参数不变，以确定某个因素对摩擦磨损的影响。使用实验中常遇到一些偶然因素，因而得到的结果只能说明是一个具体的特例，难以推测其他相似的场合，一些对摩擦磨损来说很重要的参数难以测量，或者无法测量，可以测量的参数所得的精度往往也不高。

### 1.4.3 实验室实验

实验室实验是在一定的工况条件下,用尺寸较小,结构形状简单的试样在通用的实验机上进行的实验。优点:便于研究摩擦磨损的过程和规律,适宜研究材料的摩擦磨损性能,包括润滑材料的润滑性能,可减少和控制偶然因素,适于研究各种因素的影响作用,实验周期短,费用较低,一般性的实验室实验是不强调某一零件的实际工作情况,实验形状简单,主要用于研究摩擦磨损的机理、一般性的规律以及材料的相对耐磨性,但是这种实验结果由于

条件的理想化，难以直接应用出去。

模拟性实验主要是模拟某种零件的实际工作情况，其针对性比较强，在零件批量生产前都应该做这种实验，以便于对性能实现优化。

台架实验是用真实的零部件，甚至整台机器进行的实验，这种实验的工作条件比较接近于实际工况，而比实际磨损实验的优越之处是能够预先给定可控制的工况条件，并能够测得各种摩擦磨损的参数，常见的台架实验台有轴承实验台、齿轮实验台和凸轮实验台等。

由于各种实验都有其优缺点，所以根据其特点应用在摩擦磨损实验工作中，通常先在实验室里进行试样实验，然后再进行台架实验和使用实验，构成所谓的“实验链”，这样就很容易在错综复杂的因素中抓住主要矛盾进行分析，在较短的时间内获得结果。

#### 1.4.4 模拟实验的模拟问题选择

摩擦磨损实验的模拟问题是磨损实验技术中的一个重要的课题，这是由于摩擦磨损的模拟实验与其他实验相比，它是一个系统的过程，缺乏一个理论上成熟的相似准则。摩擦磨损性能是摩擦学系统在给定条件下的综合性能，因此，实验结果的普适性较低。所以在实验室实验时，应当尽可能地模拟实际工况条件。

模拟的摩擦磨损试验系统中最多有四种参数可以与实际摩擦系统不同：①载荷；②速度；③时间；④试样尺寸和形状。而在其他方面，例如摩擦运动方式、引起磨损的机理、组成摩擦系统的各要素及其材料性质、摩擦时的温度及摩擦温升、摩擦系数等模拟的和实际的系统两者必须相同或相似。

## 2 实验设备的使用

### 2.1 光学显微镜

#### 2.1.1 概述

金相分析在材料研究领域占有十分重要的地位，是研究材料内部组织的主要手段之一。对摩擦磨损实验后的试样表面进行金相分析，是研究摩擦磨损机理的重要手段之一。试样摩擦表面组织的变化，一方面侧面反映摩擦过程中摩擦表面产生的温度高低问题，便于研究温度对后期摩擦过程和摩擦形式的影响；另一方面试样摩擦表面组织的变化，能够更清晰地证明摩擦后期实际两接触表面的真实状况，有利于更科学地研究摩擦磨损机理。

#### 2.1.2 光学显微镜的构造和基本原理

金相显微镜是进行金属显微分析的主要工具。将专门制备的金属试样放在金相显微镜下进行放大和观察，可以研究金属组织与其成分和性能之间的关系；确定各种金属经不同加工及热处理后的显微组织；鉴别金属材料质量的优劣，如各种非金属夹杂物在组织中的数量及分布情况，以及金属晶粒度大小等。因此，利用金相显微镜来观察金属的内部组织与缺陷是金属材料研究中的一种基本实验技术。

简单地讲，金相显微镜是利用光线的反射将不透明物件放大后进行观察的。

##### 2.1.2.1 金相显微镜构造

金相显微镜的种类和型式很多，最常见的有台式、立式和卧式三大类。金相显微镜的构造通常由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成，有的显微镜还附带有多种功能及摄影装置。目前，已把显微镜与计算机及相关的分析系统相连，能更方便、更快捷地进行金相分析研究工作。

##### 1) 光学系统

其主要构件是物镜和目镜，它们主要起放大作用。并获得清晰的图像。物镜的优劣直接影响成像的质量。而目镜是将物镜放大的像再次放大。

##### 2) 照明系统

主要包括光源和照明器以及其他主要附件。

(1) 光源的种类 包括白炽灯（钨丝灯）、卤钨灯、碳弧灯、氙灯和水银灯等。常用的是白炽灯和氙灯，一般白炽灯适应于作为中、小型显微镜上的光源使用，电压为 6~12V，功率 15~30W。而氙灯通过瞬间脉冲高压点燃，一般正常工作电压为 18V，功率为 150W，适用于特殊功能的观察和摄影之用。一般大型金相显微镜常同时配有两种照明光源，以适应普通观察和特殊情况的观察与摄影之用。

(2) 光源的照明方式 主要有临界照明和科勒照明。散光照明和平行光照明适应于特殊情况使用。

① 临界照明：光源的像聚焦在样品表面上，虽然可得到很高的亮度，但对光源本身亮度的均匀性要求很高。目前很少使用。

② 科勒照明：特点是光源的一次像聚焦在孔径光栏上，视场光栏和光源一次像同时聚

焦在样品表面上, 提供了一个很均匀的照明场, 目前广泛使用。

③ 散光照明: 特点是照明效率低, 只适应投射型钨丝灯照明。

④ 平行光: 照明的效果较差, 主要用于暗场照明, 适应于各类光源。

(3) 光路形式 按光路设计的形式, 显微镜有直立式和倒立式两种, 凡样品磨面向上, 物镜向下的为直立式, 而样品磨面向下, 物镜向上的为倒立式。

(4) 孔径光栏和视场光栏 孔径光栏位于光源附近, 用于调节入射光束的粗细, 以改变图像的质量。缩小孔径光栏可减少球差和轴外像差, 加大衬度, 使图像清晰, 但会使物镜的分辨率降低。视场光栏位于另一个支架上, 调节视场光栏的大小可改变视域的大小, 视场光栏愈小, 图像衬度愈佳, 观察时调至与目镜视域同样大小。

(5) 滤色片 用于吸收白光中不需要的部分, 只让一定波长的光线通过, 获得优良的图像。一般有黄色、绿色和蓝色等。

### 3) 机械系统

主要包括载物台、镜筒、调节螺丝和底座。

(1) 载物台: 用于放置金相样品。

(2) 镜筒: 用于联结物镜、目镜等部件。

(3) 调节螺丝: 有粗调和细调螺丝, 用于图像的聚焦调节。

(4) 底座: 起支承镜体的作用。

## 2.1.2.2 金相显微镜基本原理

金相显微镜的基本原理分为光学放大原理和主要性能指标。

### 1) 光学放大原理

金相显微镜是依靠光学系统实现放大作用的, 其基本原理如图 2-1 所示。光学系统主要包括物镜、目镜及一些辅助光学零件。对着被观察物体 AB 的一组透镜叫物镜  $O_1$ ; 对着眼睛的一组透镜叫目镜  $O_2$ 。现代显微镜的物镜和目镜都是由复杂的透镜系统所组成。

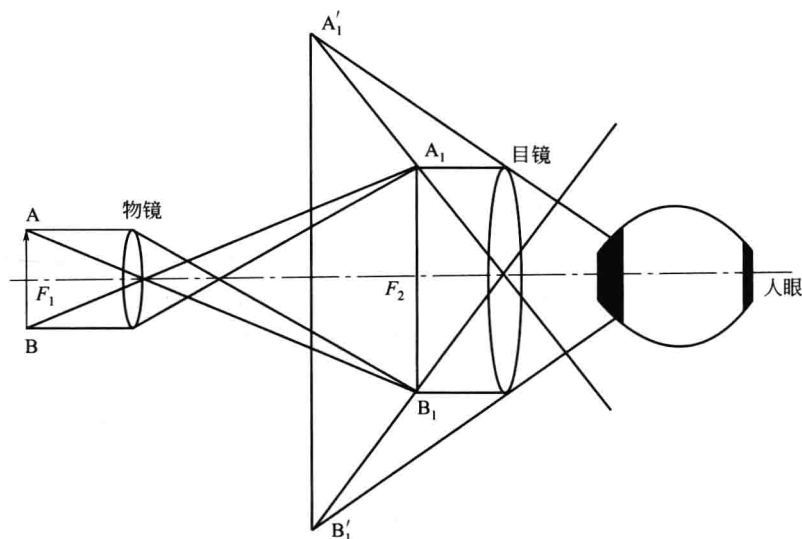


图 2-1 金相显微镜的光学放大原理示意图

光学显微镜的放大倍数可达到 1600~2000 倍。当被观察物体 AB 置于物镜前焦点略远处时, 物体的反射光线穿过物镜经折射后, 得到一个放大的倒立实像  $A_1B_1$  (称为中间像)。

若  $A_1B_1$  处于目镜焦距之内, 则通过目镜观察到的物象是经目镜再次放大的虚像  $A_1'B_1'$ 。由于正常人眼观察物体时最适宜的距离是 250mm (称为明视距离), 因此在显微镜设计上, 应让虚像  $A_1'B_1'$  正好落在距人眼 250mm 处, 以使观察到的物体影像最清晰。

## 2) 主要性能指标

(1) 放大倍数 显微镜的放大倍数为物镜放大倍数  $M_{\text{物}}$  和目镜放大倍数  $M_{\text{目}}$  的乘积, 即:

$$M = M_{\text{物}} \times M_{\text{目}} = \frac{L}{f_{\text{物}}} \times \frac{D}{f_{\text{目}}}$$

式中  $f_{\text{物}}$ ——物镜的焦距;

$f_{\text{目}}$ ——目镜的焦距;

$L$ ——显微镜的光学镜筒长度;

$D$ ——明视距离 (250mm)。

$f_{\text{物}}$  和  $f_{\text{目}}$  越短或  $L$  越长, 则显微镜的放大倍数越高。有的小型显微镜的放大倍数需再乘一个镜筒系数, 因为它的镜筒长度比一般显微镜短些。

显微镜的主要放大倍数一般是通过物镜来保证, 物镜的最高放大倍数可达 100 倍, 目镜的放大倍数可达 25 倍。在物镜和目镜的镜筒上, 均标注有放大倍数, 放大倍数常用符号“ $\times$ ”表示, 如  $100\times$ ,  $200\times$  等。

(2) 鉴别率 金相显微镜的鉴别率是指它能清晰地分辨试样上两点间最小距离  $d$  的能力。 $d$  值越小, 鉴别率越高。根据光学衍射原理, 试样上的某一点通过物镜成像后, 我们看到并不是一个真正的点像, 而是具有一定尺寸的白色圆斑, 四周围绕着许多衍射环。当试样上两个相邻点的距离极近时, 成像后由于部分重叠而不能分清为两个点。只有当试样上两点距离达到某一  $d$  值时, 才能将两点分辨清楚。

显微镜的鉴别率取决于使用光线的波长 ( $\lambda$ ) 和物镜的数值孔径 ( $A$ ), 而与目镜无关, 其  $d$  值可由下式计算:

$$d = \frac{\lambda}{2A}$$

在一般显微镜中, 光源的波长可通过加滤色片来改变, 例如: 蓝光的波长 ( $\lambda = 0.44\mu$ ) 比黄绿光 ( $\lambda = 0.55\mu$ ) 短, 所以鉴别率较黄绿光高 25%。当光源的波长一定时, 可通过改变物镜的数值孔径  $A$  来调节显微镜的鉴别率。

(3) 物镜的数值孔径 物镜的数值孔径表示物镜的聚光能力, 如图 2-2 所示。数值孔径

大的物镜聚光能力强, 能吸收更多的光线, 使物像更清晰, 数值孔径  $A$  可由下式计算:

$$A = n \sin \varphi$$

式中  $n$ ——物镜与试样之间介质的折射率;

$\varphi$ ——物镜孔径角的一半, 即通过物镜边缘的光线与物镜轴线所成夹角。

$n$  越大或  $\varphi$  越大, 则  $A$  越大, 物镜的鉴别率就越高。由于  $\varphi$  总是小于 90 度的。所以在空气介质 ( $n = 1$ ) 中使用时,  $A$  一定小于 1, 这类物镜称干系物镜。若在物镜与试样之间充满松柏油介质 ( $n = 1.52$ ), 则

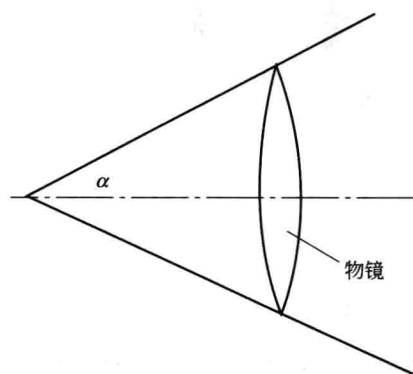


图 2-2 物镜孔径角

A 值最高可达 1.4, 这就是显微镜在高倍观察时用的油浸系物镜 (简称油镜头)。每个物镜都有一个额定 A 值, 与放大倍数一起标刻在物镜头上。

(4) 放大倍数、数值孔径、鉴别率之间的关系 显微镜的同一放大倍数可由不同倍数的物镜和目镜组合起来实现, 但存在着如何合理选用物镜和目镜的问题。这是因为: 人眼在 250mm 处的鉴别率为  $0.15 \sim 0.30\text{mm}$ , 要使物镜可分辨的最近两点的距离  $d$  能为人眼所分辨, 则必须将  $d$  放大到  $0.15 \sim 0.30\text{mm}$ ,

$$\text{即: } d \times M = 0.15 \sim 0.30 \text{ (mm)}$$

由于  $d = \frac{\lambda}{2A}$ , 则:

$$M = \frac{1}{\lambda} (0.3 \sim 0.6) A$$

在常用光线的波长范围内, 上式可进一步简化为:

$$M \approx 500A \sim 1000A$$

所以, 显微镜的放大倍数  $M$  与物镜的数值孔径之间存在一定关系, 其范围称有效放大倍数范围。在选用物镜时, 必须使显微镜的放大倍数在该物镜数值孔径的 500 倍至 1000 倍之间。若  $M < 500A$ , 则未能充分发挥物镜的鉴别率。若  $M > 1000A$ , 则由于物镜鉴别率不足而形成“虚伪放大”, 细微部分仍分辨不清。

(5) 像差 单片透镜在成像过程中, 由于几何条件的限制及其他因素的影响, 常使影像变得模糊不清或发生变形现象, 这种缺陷称为像差。由于物镜起主要放大作用, 所以显微镜成像的质量主要取决于物镜, 应首先对物镜像差进行校正, 普通透镜成像的主要缺陷有球面像差和色像差两种。

① 球面像差 如图 2-3 所示, 当来自 A 点的单色光 (即某一特定波长的光线) 通过透镜后, 由于透镜表面呈球面形, 折射光线不能交于一点, 从而使放大后的影像变得模糊不清。

为降低球面像差, 常采用由多片透镜组成的透镜组, 即将凸透镜和凹透镜组合在一起 (称为复合透镜)。由于这两种透镜的球面像差性质相反, 因此可以相互抵消。除此之外, 在使用显微镜时, 也可采取调节孔径光阑的方法, 适当控制入射光束粗细, 让极细的一束光通过透镜中心部位, 这样可将球面像差降至最低限度。

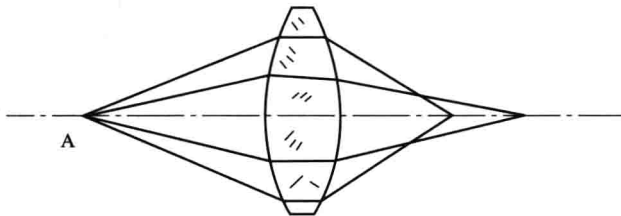


图 2-3 球面像差示意图

② 色像差 如图 2-4 所示, 当来自 A 点的白色光通过透镜后, 由于组成白色光的七种单色光的波长不同, 其折射率也不同, 使折射光线不能交于一点, 紫光折射最强, 红光折射最弱, 结果使成像模糊不清。

为消除色像差, 一方面可用消色差物镜和复消色差物镜进行校正。消色差物镜常与普通目镜配合, 用于低倍和中倍观察; 复消色差物镜与补偿目镜配合, 用于高倍观察。另一方面

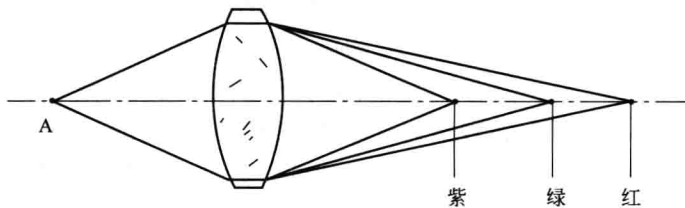


图 2-4 色像差示意图

可通过加滤色片得到单色光，常用的滤色片有蓝色、绿色和黄色等。

### 2.1.3 光学显微镜的使用

金相显微镜的种类和型式很多，但最常见的型式有台式、立式和卧式三大类。其构造通常均由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成，有的显微镜还附带照相装置和暗场照明系统等。现以国产 XJB-1 型金相显微镜为例进行说明；其主要结构如图 2-5、图 2-6 所示。

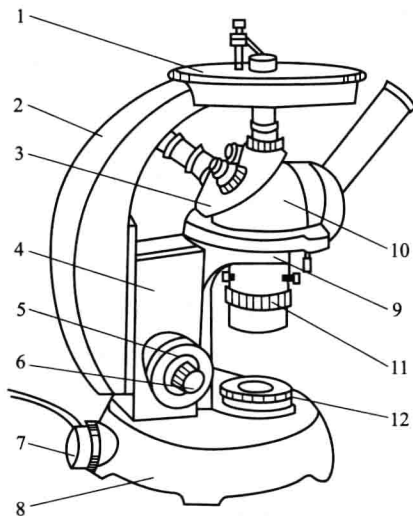


图 2-5 标准型金相显微镜的结构

- 1—载物台；2—镜臂；3—物镜转换器；
- 4—微动座；5—粗动调焦手轮；
- 6—微动调节手轮；7—照明装置；
- 8—底座；9—平台托架；10—碗头组；
- 11—视场光阑；12—孔径光阑

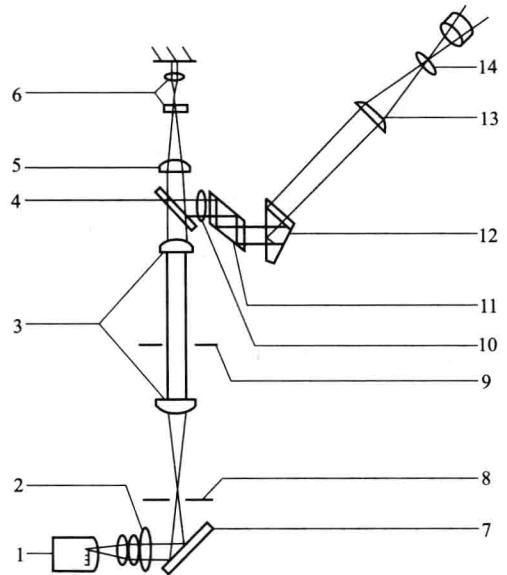


图 2-6 标准型金相显微镜的光学系统

- 1—灯泡；2—聚光镜组（一）；
- 3—聚光镜组（二）；4—半反射镜；
- 5—辅助透镜（一）；6—物镜组；
- 7—反光镜；8—孔径光阑；9—视场光阑；
- 10—辅助透镜（二）；11、12—棱镜；
- 13—场镜；14—接目镜

(1) 使用规程 金相显微镜是一种精密光学仪器，在使用时要求细心和谨慎，严格按照使用规程进行操作。

① 将显微镜的光源插头接在低压（6~8V）变压器上，接通电源。

② 根据放大倍数，选用所需的物镜和目镜，分别安装在物镜座上 and 目镜筒内，旋动物镜转换器，使物镜进入光路并定位（可感觉到定位器定位）。

③ 将试样放在样品台上中心，使观察面朝下并用弹簧片压住。

④ 转动粗调手轮先使镜筒上升，同时用眼观察，使物镜尽可能接近试样表面（但不得



与之相碰), 然后反向转动粗调手轮, 使镜筒渐渐下降以调节焦距, 当视场亮度增强时, 再改用微调手轮调节, 直到物像最清晰为止。

⑤ 适当调节孔径光阑和视场光阑, 以获得最佳质量的物像。

⑥ 如果使用油浸系物镜, 可在物镜的前透镜上滴一些松柏油, 也可以将松柏油直接滴在试样上, 油镜头用后, 应立即用棉花蘸取二甲苯溶液擦净, 再用擦镜纸擦干。

(2) 注意事项 金相显微镜使用过程中, 还应注意以下事项。

① 操作应细心, 不能有粗暴和剧烈动作, 严禁自行拆卸显微镜部件。

② 显微镜的镜头和试样表面不能用手直接触摸, 若镜头中落入灰尘, 可用镜头纸或软毛刷轻轻擦拭。

③ 显微镜的照明灯泡必须接在  $6\sim 8\text{V}$  变压器上, 切勿直接插入  $220\text{V}$  电源, 以免烧毁灯泡。

④ 旋转粗调和微调手轮时, 动作要慢, 碰到故障应立即报告, 不能强行用力转动, 以免损坏机件。

## 2.2 X 射线衍射仪

### 2.2.1 概述

物相分析对研究材料摩擦磨损性能具有十分重要的意义, 有的研究者在材料摩擦磨损实验中, 并不进行物相分析, 忽略了物相分析的重要。其实在摩擦过程中实际接触面为两个微凸表面, 不同相的微凸表面的硬度不尽相同, 不同硬度下两接触面的摩擦磨损性能不相同, 两接触面的摩擦磨损机理也不相同。可见, 研究接触表面的相组成, 对于揭示材料的磨损机理具有重要意义。

在摩擦磨损过程中, 接触表面会因为摩擦力的存在, 而产生大量的摩擦热, 就会使摩擦表面温度升高, 如果热量不及时传递, 就会影响接触面的相组成。所以对摩擦表面进行物相分析, 也能够间接地研究摩擦表面的温度高低, 为摩擦磨损机理的研究提供了新的途径。

### 2.2.2 X 射线衍射仪的构造

X 射线衍射仪是进行 X 射线分析的重要设备, 主要由 X 射线发生器、测角仪、记录仪和水冷却系统组成。新型的衍射仪还带有条件输入和数据处理系统。图 2-7 给出了 X 射线衍射仪框图。

X 射线发生器主要由高压控制系统和 X 光管组成, 它是产生 X 射线的装置, 由 X 光管发射出的 X 射线包括连续 X 射线光谱和特征 X 射线光谱, 连续 X 射线光谱主要用于判断晶体的对称性和进行晶体定向的劳厄法, 特征 X 射线用于进行晶体结构研究的旋转单体法和进行物相鉴定的粉末法。测角仪是衍射仪的重要部分, 其光路图如图 2-8 所示。

#### 1) 测角仪的工作原理

测角仪在工作时, X 射线从射线管发出, 经一系列狭缝后, 照射在样品上产生衍射。计数器围绕测角仪的轴在测角仪圆上运动, 记录衍射线, 其旋转的角度即  $2\theta$ , 可以从刻度盘上读出。与此同时, 样品台也围绕测角仪的轴旋转, 转速为计数器转速的  $1/2$ 。

为了能增大衍射强度, 衍射仪法中采用的是平板式样品, 以便使试样被 X 射线照射的面积较大。这里的关键是一方面试样要满足布拉格方程的反射条件。另一方面还要满足衍射线的聚焦条件, 即使整个试样上产生的 X 衍射线均能被计数器所接收。

在理想情况下, X 射线源、计数器和试样在一个聚焦圆上。且试样是弯曲的, 曲率与聚

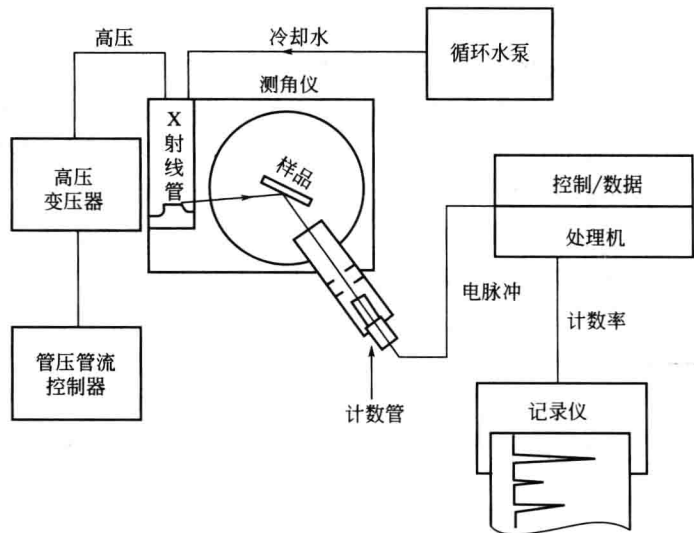


图 2-7 X 射线衍射仪框图

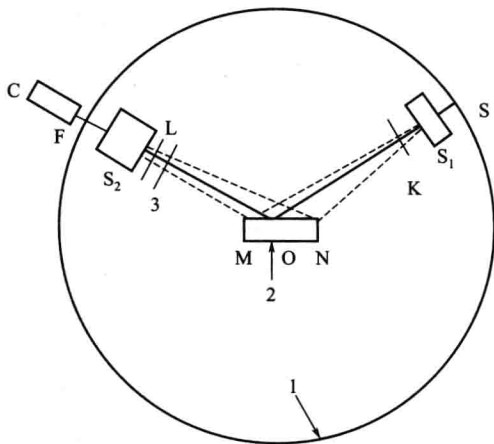


图 2-8 测角仪光路示意图

1—测角仪圆；2—试样；3—滤波片；S—光源；  
S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>—梭拉光栏；K—发散狭缝；  
L—防散射狭缝；F—接收狭缝；C—计数管

焦圆相同。对于粉末多晶体试样，在任何方位上总会有一些晶面满足布拉格方程产生反射，而且反射是向四面八方的，但是，那些平行于试样表面的晶面满足布拉格方程时，产生衍射，且满足入射角=反射角的条件。由平面几何可知，位于同一圆弧上的圆周角相等，所以，位于试样不同部位 M，O，N 处平行于试样表面的（hkl）晶面，可以把各自的反射线会聚到 F 点（由于 S 是线光源，所以 F 点得到的也是线光源）。这样便达到了聚焦的目的。

在测角仪的实际工作中，通常 X 射线源是固定不动的。计数器并不沿聚焦圆移动，而是沿测角仪圆移动逐个地对衍射线进行测量。因此聚焦圆的半径一直随着  $2\theta$  角的变化而变化。在这种情况下，为了满足聚焦条件，即相对试样的表面，满足入射角等于反射角的条件，必

须使试样与计数器转动的角速度保持 1 : 2 的速度比。不过，在实际工作中，这种聚焦不是十分精确的。因为，实际工作中所采用的样品不是弧形的而是平面的，并让其与聚焦圆相切，因此实际上只有一个点在聚焦圆上。这样，衍射线并非严格地聚集在 F 点上，而是有一定的发散。但这对于一般目的而言，尤其是  $2\theta$  角不大的情况下（ $2\theta$  角越小，聚焦圆的曲率半径越大，越接近于平面），是可以满足要求的。

## 2) X 射线探测器

衍射仪的 X 射线探测器为计数管。它是根据 X 射线光子的计数来探测衍射线是存在与否以及它们的强度。它与检测记录装置一起代替了照相法中底片的作用。其主要作用是将 X