

· 四川大学精品立项教材 ·

材料成型及控制工程专业 实验教程

AILIAO CHENGXING JI KONGZHI GONGCHENG ZHUANYE
SHIYAN JIAOCHENG

主 编 郭智兴

副主编 鲜 广 曹建国 孙 兰

校外借



四川大学出版社

· 四川大学精品立项教材 ·

材料成型及控制工程专业 实验教程

 AILIAO CHENGXING JI KONGZHI GONGCHENG ZHUANYE
SHIYAN JIAOCHENG

主 编 郭智兴 (四川大学)

副主编 鲜 广 (四川大学)

孙 兰 (四川大学)

编 委 (以姓氏笔画为序)

万维财 (西华大学)

杜 昊 (贵州大学)

杨 梅 (成都理工大学)

张 瑞 (新疆大学)

周 杰 (重庆大学)

董志红 (成都大学)

曹建国 (四川大学)

龙剑平 (成都理工大学)

李海丰 (湖北汽车工业学院)

吝 楠 (湖南大学)

金永中 (四川理工学院)

罗征志 (西南交通大学)

薛 松 (西南科技大学)



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:蒋 筠
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

材料成型及控制工程专业实验教程 / 郭智兴主编.
—成都:四川大学出版社, 2017. 12
ISBN 978-7-5690-1525-6

I. ①材… II. ①郭… III. ①工程材料—成型—实验—教材 IV. ①TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 001312 号

书名 材料成型及控制工程专业实验教程

主 编	郭智兴
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5690-1525-6
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	14.5
字 数	353 千字
版 次	2018 年 1 月第 1 版
印 次	2018 年 1 月第 1 次印刷
定 价	48.00 元



- ◆ 读者邮购本书,请与本社发行科联系。
电话:(028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码:610065
- ◆ 本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。
- ◆ 网址:<http://www.scupress.net>

版权所有◆侵权必究

前 言

材料成型及控制工程专业是材料科学、成型工艺与自动控制技术的综合与交叉，是一个实践性很强的专业。材料成型技术在冶金、机械制造、轨道交通、航空航天等各个方面得到了广泛的应用，是先进制造技术的重要组成部分。

实验教学不仅是理论教学的重要补充，更是培养学生实践与创新能力的的重要支撑。本书基于编者多年实践教学经验并参考国内其他教材编写而成，其目的是为本专业的实验教学提供参考。本书主要内容包括实验室安全与实验教学、材料科学基础实验、工程材料实验、粉末冶金实验、铸造综合实验、塑性成型实验、冶金工程实验、表面工程实验、材料的组织性能检测与控制实验，可作为“材料科学基础”“工程材料”“材料检测与控制”“材料成型原理”“粉末冶金工程”“焊接工程学”“铸件形成理论”“表面工程”“传热与传质”“材料力学性能”“材料检测与控制”等材料成型及控制工程专业理论课程配套的实验教学教材。本书既有材料科学的实验，也包含了多种成型技术相关实验；既有基础性实验，也有综合性和设计性实验；既有实验内容，也有实验安全和实验教学规范介绍。除包含必要的基础性实验外，还设置了多个综合性或设计性实验，要求学生查阅相关文献，撰写实验设计报告，根据实验条件和实验学时自主地完成实验，以此培养学生的实践能力、综合运用知识的能力和创新能力。

本书能满足国内不同高校材料成型及控制工程专业不同专业的实验教学需求，也可供材料科学与工程、材料工程、机械工程等相关专业技术人员参考。

本书第1、2、3、4、6、8、10章由郭智兴编写，第5、9章由鲜广编写，第7章由曹建国与孙兰编写，全书由郭智兴统稿。

本书的出版得到了2016年四川大学立项教材建设项目资助。在编写过程中，本书参考了国内兄弟院校出版的实验教材和理论著作，也有部分内容来源于设备和试样供应商的说明书、官方网站，文玉华教授、彭华备副教授对本书的编写提出了许多建议，在编写过程中研究生李体军、陈诚、李深厚、孙磊、叶俊缪、刘俊波等参与了书稿整理工作，在此一并致谢。

由于编者水平有限，经验不足，书中难免存在许多不当之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

2017年9月

目 录

第 1 章 实验室安全与实验教学	(1)
1.1 实验室安全注意事项	(1)
1.2 意外事故应急处理措施	(4)
1.3 实验教学	(6)
第 2 章 材料科学基础实验	(7)
2.1 实验 1 金相显微镜的基本原理、金相试样制备与观察	(7)
2.2 实验 2 铁碳合金平衡组织观察	(18)
2.3 实验 3 铁碳合金非平衡冷却显微组织观察	(23)
2.4 实验 4 碳钢的热处理工艺、组织与性能综合实验	(32)
2.5 实验 5 用热分析法建立二元合金相图	(36)
2.6 实验 6 金属材料的塑性变形与再结晶组织分析实验	(39)
第 3 章 工程材料实验	(44)
3.1 实验 1 合金钢的显微组织观察	(44)
3.2 实验 2 铸铁的显微组织分析	(51)
3.3 实验 3 有色金属合金的微观组织观察	(56)
3.4 实验 4 铝合金时效实验	(61)
第 4 章 粉末冶金综合实验	(65)
4.1 实验 1 粉体特性测试综合实验	(65)
4.2 实验 2 粉末冶金材料制备技术实验	(69)
4.3 实验 3 硬质合金材料综合实验	(74)
4.4 实验 4 粉末冶金摩擦材料综合实验	(80)
4.5 实验 5 基于溶胶—凝胶法的超细粉体的制备与表征	(83)
第 5 章 铸造综合实验	(86)
5.1 实验 1 原砂特性测试综合实验	(86)
5.2 实验 2 黏结剂特性测试综合实验	(92)
5.3 实验 3 型砂力学性能测试综合实验	(105)
5.4 实验 4 型砂物理性能测试综合实验	(113)
5.5 实验 5 浇注系统的水力模拟综合实验	(120)

5.6	实验6	液态金属凝固过程模拟综合实验	(124)
5.7	实验7	铸钢综合实验	(127)
5.8	实验8	铝合金熔铸综合实验	(131)
第6章 焊接成型实验			(137)
6.1	实验1	异种材料的高频感应钎焊及接头微观组织与性能分析	(137)
6.2	实验2	低碳钢熔焊接头分区微观组织与性能分析	(140)
第7章 塑性成形实验			(145)
7.1	实验1	冲压模具拆装测绘实验	(145)
7.2	实验2	金属板料冲压成形性能实验	(152)
第8章 冶金工程实验			(156)
8.1	实验1	扩散实验	(156)
8.2	实验2	利用瞬态平面热源法测导热系数	(159)
第9章 表面工程实验			(163)
9.1	实验1	碳钢表面化学镀镍设计性实验	(163)
9.2	实验2	碳钢表面电镀铜设计性实验	(166)
9.3	实验3	铝合金的阳极氧化与着色设计性实验	(170)
9.4	实验4	碳钢磷化处理设计性实验	(173)
9.5	实验5	物理气相沉积法制备硬质涂层设计性实验	(177)
9.6	实验6	材料表面腐蚀与耐蚀特性检测综合实验	(185)
9.7	实验7	涂层/镀层耐磨性与厚度的快速测定综合实验	(189)
第10章 材料的组织性能检测与控制实验			(194)
10.1	实验1	材料静力学性能综合实验	(194)
10.2	实验2	材料在动载下的力学性能综合实验	(202)
10.3	实验3	热电偶的制作、校验与测温	(210)
10.4	实验4	差热分析实验	(215)
10.5	实验5	材料物相结构分析实验	(218)
10.6	实验6	利用扫描电镜观察材料微观组织	(224)

第 1 章 实验室安全与实验教学

1.1 实验室安全注意事项

实验室潜藏着各种危险因素，这些潜在因素可能引发各种事故，造成环境污染或人体伤害，甚至可能危及人的生命安全。材料成型及控制工程实验室情况复杂，涉及机械类、高温类、高压类、化学试剂等方面的安全问题，在实验教学中首先应对学生进行安全教育，让师生重视安全，防患于未然。

1.1.1 机械类设备安全

实验室内的抛光机、液压机、万能试验机、磨损试验机、球磨机、切割机、线切割机、机床等机械类设备在运行过程中，工作部分将发生相对运动，大部分为旋转运动，试样或碎片有可能被甩出，并伴随不同程度的机械力，使用者应着装整洁，将长发盘起，不得穿高跟鞋或拖鞋，应将身体控制在安全区域内，注意防止机械伤害。若设备仪器运转中出现异常现象或声音，须及时停机检查，一切正常后方能重新开机。传动设备外露转动部分必须安装防护罩。

1.1.2 高温类设备安全

实验室内的热处理炉、高温烧结炉、钎焊炉、熔炼炉等高温类设备使用温度最高可达 1000 多摄氏度，使用者不得触碰设备上的高温区域，取样时应确保冷却充分，注意防止烫伤，使用过程中不得将易燃物质放在设备机身上和靠近设备处位置。

1.1.3 高压类设备安全

实验室内的高压釜、钢瓶等高压类装置在使用过程中，禁止受到冲击，避免引发爆炸。钢瓶搬运时旋上钢瓶帽，轻拿轻放，钢瓶应存放在阴凉、干燥、远离热源的地方，使用时应装减压阀和压力表，开启总阀门时，不要将头或身体正对总阀门，防止阀门或压力表冲出伤人。

1.1.4 腐蚀类相关仪器安全

实验室内的盐雾腐蚀箱、电化学工作站等腐蚀类测试仪器，在使用过程中容器内盛放有腐蚀液体，应当防止溶液发生泄露。在配制腐蚀液时须小心谨慎，避免试液溅洒和与身体直接接触。

1.1.5 设备仪器通用安全

实验室内的金相显微镜系统、激光粒度仪、精密电子天平、显微硬度计等通用精密仪器，使用时放置试样应轻拿轻放，试样的状态、操作使用应严格按照要求进行，避免对仪器的关键部件造成损坏，影响测试的清晰度、准确度，设备仪器使用完毕后必须将其恢复到原有状态。

1.1.6 化学试剂安全

在进行金相腐蚀或表面工程实验时，会涉及各种化学试剂，有许多具有腐蚀性、毒性、易燃性和不稳定性，属化学危险物品。实验室内使用化学危险物品，应格外小心，使用前应当了解化学危险物品使用安全与注意事项。

(1) 在使用化学危险物品时，须穿戴围裙、眼罩、手套和口罩等其他个人防护装备；特别是液体类腐蚀药品，使用时需谨慎，避免溅洒在身上发生腐蚀，也防止洒倒在实验台、实验仪器上造成腐蚀；接触有机试剂时，不能戴隐形眼镜。

(2) 称取药品试剂应按操作规程进行，用后盖好，必要时可封口或用黑纸包裹，不得使用过期或变质药品。所有药品、标样、溶液都应有标签，绝对不要在容器内装入与标签不相符的药品。

(3) 强酸、强碱、强氧化剂、溴、磷、钠、钾、苯酚、冰醋酸等其他具有强烈腐蚀性的化学药品都会腐蚀皮肤，特别要防止溅入眼内。使用浓硝酸、盐酸、硫酸、高氯酸、氨水时，均应在通风橱或在通风情况下操作，如不小心溅到皮肤或眼内，应立即用水冲洗，然后用5%碳酸氢钠溶液（酸腐蚀时采用）或5%硼酸溶液（碱腐蚀时采用）冲洗，最后用水冲洗。液氧、液氮等低温也会严重灼伤皮肤，使用时要小心。万一灼伤应及时治疗。

(4) 在实验室内使用浓盐酸、氢氧酸、硫化氢等有毒气体和易挥发性腐蚀物时，都必须在通风橱或通风的空间内进行，戴上防护口罩，避免吸入。氰化物、可溶性钡盐、重金属盐、三氧化二砷、高汞盐等剧毒药品，应妥善保管，使用时要特别小心。禁止在实验过程中喝水、吃东西，离开实验室及饭前要洗净双手。

(5) 丙酮、乙醇、苯等有机溶剂非常容易燃烧，大量使用时室内不能有明火、电火花或静电放电。实验室内不可存放过多，用后还要及时回收处理，不可倒入下水道，以免聚集引起火灾。易燃溶剂加热时，必须在水浴或沙浴中进行，避免使用明火。切忌将热电炉放入实验柜中，以免发生火灾。

(6) 磷、金属钠、钾、电石及金属氢化物等，在空气中易氧化自燃，还有一些金属

如铁、锌、铝等粉末，比表面大也易在空气中氧化自燃。这些物质要隔绝空气保存，使用时要特别小心，避免引发火灾。

(7) 装过强腐蚀性、可燃性、有毒或易爆物品的器皿，应由操作者亲手洗净。空试剂瓶要统一处理，不可乱扔，以免发生意外事故。

(8) 使用易燃易爆物品的实验，要严禁烟火，不准吸烟或动用明火。使用酒精喷灯时，应先将气孔调小，再点燃。酒精不能加得太多，用后应及时熄灭酒精灯。

(9) 拿取正在沸腾的溶液时，应用瓶夹先轻摇动以后取下，以免溅出伤人。

(10) 将玻璃棒、玻璃管、温度计等插入或拔出胶塞、胶布时，应垫有棉布，两手都要靠近塞子，或用甘油甚至水，都可以将玻璃导管很容易插入或拔出塞孔，切不可强行插入或拔出，以免折断而刺伤人。

(11) 开启高压气瓶时应缓慢，不得将出口对着人。

(12) 移动、开启大瓶液体药品时，不能将瓶直接放在水泥地板上，最好用橡皮布或草垫垫好，若为石膏包封的，可用水泡软后开启，严禁用锤砸、打，以防破裂。

(13) 实验产生的废弃物按液体和固体分别存放在指定的位置和容器内。对于不能确定性质的化学废弃物均按危险物品处理。

1.1.7 用水用电安全

实验室内的各种仪器设备均需用电，部分大型设备的用电功率很大，部分大型设备还需有冷却水。违章用电、水路故障可致使仪器设备损坏，造成人身伤亡、火灾等严重事故。实验室要注意安全用电、合理用水，防止触电，防止短路，防止引起火灾。

(1) 大型设备的用电必须由厂家或专业电工现场安装，其他人员不得擅自更改线路。电器设备必须接地或用双层绝缘。电线、电源插座、插头必须完整无损。在潮湿环境的电器设备，要安装接地故障断路器。实验室内尽量避免在插座上接其他多用插座和避免拖拉过多的电线。对设备存在的潜在用电危险，须在醒目位置进行安全警示说明。

(2) 使用用电仪器设备时，应先了解其性能，按操作规程操作，若电器设备发生过热现象或出现糊焦味时，应立即切断电源。

(3) 箱式电阻炉、硅碳棒箱或炉的棒端，均应设安全罩。应加接地线的设备，要妥善接地，以防止触电事故。

(4) 注意保持电线和电器设备的干燥，防止线路和设备受潮漏电。

(5) 实验室内不应有裸露的电线头；电源开关箱内，不准堆放物品，以免触电或燃烧。

(6) 要警惕实验室内发生电火花或静电，尤其在使用可能构成爆炸混合物的可燃性气体时，更需注意。如遇电线走火，切勿用水或导电的酸碱泡沫灭火器灭火，应切断电源，用沙或二氧化碳灭火器灭火。

(7) 各种仪器设备（冰箱、温箱除外），使用完毕后要立即切断电源，旋钮复原归位，待仔细检查后方可离开。实验者较长时间离开房间或电源中断时，要切断电源开关，尤其是要注意切断加热电器设备的电源开关。

(8) 实验室建筑物的电力系统、配电箱、保险丝、断路器的维修工作必须由专业维

修人员进行。大型高功率设备的校准和维修，原则上由专业电工进行。对常规用电设备的维修，可由实验技术人员自行解决。维修时要确保手干燥，谨慎操作。除校准仪器外，仪器不得接电维修。严禁用湿手去开启电闸和电器开关，凡漏电仪器不要使用，以免触电。

(9) 有人触电时，应立即切断电源，或用绝缘物体将电线与人体分离后，再实施抢救。

(10) 实验室内真空烧结炉、钎焊炉、熔炼炉等大型高温设备运行时配有冷却水，设备运行前应确保水路畅通，设备运行过程中设备使用者中途不得长时间离开，避免中途发生水管爆漏、停水等意外情况。

(11) 对于需要实时冷却的设备，其冷却水路须根据设备用水要求进行单独布置，不得影响洗手池自来水的正常供水。利用实验室内的蓄水池循环供水时，禁止将蓄水池内的冷却水再接入自来水管网中。

1.2 意外事故应急处理措施

1.2.1 实验室常用急救工具

(1) 消防器材：干粉灭火器、消防沙等。

(2) 急救药箱：碘酒、红汞、紫药水、甘油、凡士林、烫伤药膏、70%酒精、3%的双氧水、1%的乙酸溶液、1%的硼酸溶液、1%的饱和碳酸钠溶液、绷带、纱布、药棉、棉花签、创口贴、医用镊子、剪刀等。

1.2.2 火灾事故

一旦发生火灾，发现的师生应立即切断起火点现场的电源（开关），并尽可能利用现有消防设备进行扑救，将火灾控制在最小危害，避免火情的进一步蔓延。若使用现场消防设备难以扑灭或无法控制火势时，应立即拨打 119 电话报警求助，同时向学校保卫处报告，并安排人员引导消防车辆进入现场。报警的同时，应在保证人身安全的条件下迅速赶往火灾现场投入灭火救助工作。发生火灾时，如有人员被火围困，要立即组织力量抢救，坚持“救人第一，救人重于救火”的原则，同时拨打 120 急救电话求助抢救伤员。应当根据火场的具体情况，按照事先选定的路线迅速组织师生撤离。火灾扑灭后，要注意保护好现场，接受事故调查，如实提供火灾情况，同时将事故情况上报。

1.2.3 触电事故

发现人员触电应迅速采取措施使触电者脱离电源，并迅速切断电源，可用干竹竿、干木棍、木椅（凳）等绝缘器具使触电者脱离电源，不可赤手直接与触电者的身体接触。

立即进行临时急救，患者呼吸停止或心脏停搏时应立即施行人工呼吸或心脏按压。

特别注意出现假死现象时,千万不能放弃抢救,应尽快送往医院救治。疏散围观人员,保证现场空气流通,避免再次发生触电事故。

1.2.4 化学危险物品事故

(1) 氰化钾、氰化钠污染,将硫代硫酸钠(高锰酸钾、次氯酸钠、硫酸亚铁)溶液浇在污染处后,用热水冲,再用冷水冲。

硫、磷及其他有机磷剧毒农药,如苯硫磷、敌死通污染,可先用石灰将撒泼的药液吸去,继而用碱液透湿污染处,然后用热水及冷水冲洗干净。

硫酸二甲酯撒漏后,先用氨水洒在污染处,使其起中和作用;也可用漂白粉加五倍水后浸湿污染处,再用碱水浸湿,最后用热水和冷水各冲一遍。

甲醛撒漏后,可用漂白粉加五倍水后浸湿污染处,使甲醛遇漂白粉氧化成甲酸,再用水冲洗干净。

汞撒漏后,可先行收集,尽可能不使其泻入地下缝隙,并用硫黄粉盖在洒落的地方,使汞转换成不挥发的硫化汞。

苯胺撒漏后,可用稀盐酸溶液浸湿污染处,再用水冲洗。因为苯胺呈碱性,能与盐酸反应生成盐酸盐,如用硫酸溶液,可生成硫酸盐。

盛磷容器破裂,一旦脱水将产生自燃,故切勿直接接触,应用工具将磷迅速移入盛水容器中。污染处先用石灰乳浸湿,再用水冲,被黄磷污染过的工具可用5%硫酸铜溶液冲洗。

砷撒漏,可用碱水和氢氧化铁解毒,再用水冲洗。

溴撒漏,可用氨水使之生成铵盐,再用水冲洗干净。

(2) 浓酸流到实验台上,加氢氧化钠溶液,水冲洗,抹布擦干。

浓碱流到实验台上,加稀醋酸,水冲洗,抹布擦干。

(3) 浓酸沾到皮肤或衣物上,衣物立即用较多的水冲洗(皮肤不慎沾上浓硫酸,应立即用布拭去,再用大量的水冲洗),再涂上3%~5%的氢氧化钠溶液。

浓碱沾到皮肤或衣物上,用较多的水冲洗,再涂上硼酸溶液。

(4) 眼睛里溅入酸或碱溶液,立即用水冲洗,切不可用手揉眼睛,洗的时候要眨眼睛,必要时请医生治疗。

(5) 中毒时,对中毒者的急救主要在于把患者送往医院或医生到达之前,尽快将患者从中毒物质区域移出,并尽量弄清致毒物质,以便协助医生排除中毒者体内毒物。如遇中毒者呼吸停止、心脏停搏时,应立即施行人工呼吸、心脏按压,直至医生到达或送到医院为止。同时拨打120急救电话进行求助,同时向医生提供中毒情况。

1.2.5 灼伤、创伤、烧伤、烫伤事故

(1) 灼伤:一般用大量自来水冲洗,再用高锰酸钾浸润伤处;或用苏打水洗,再擦烫伤膏或者凡士林。

(2) 创伤:小的创伤可用消毒镊子或消毒纱布把伤口清洗干净,并用3.5%的碘酒

涂在伤口周围，包起来。若出血较多，可用压迫法止血，同时处理好伤口，扑上止血消炎粉等药物，较紧地包扎起来即可。较大的创伤或者动、静脉出血，甚至骨折时，应立即用急救绷带在伤口出血部上方扎紧止血，用消毒纱布盖住伤口，立即送医务室或医院救治。当止血时间较长时，应注意每隔 1~2 小时适当放松一次，以免肢体缺血坏死。同时拨打 120 急救电话。

(3) 烧伤：普通轻度烧伤，可擦用清凉乳剂于创伤处，并包扎好；略重的烧伤，可视烧伤情况立即送医院处理；遇有休克的伤员应立即通知医院前来抢救、处理。化学烧伤时，应迅速解脱衣服，首先清除残存在皮肤上的化学药品，用水多次冲洗，同时视烧伤情况立即送医院救治或通知医院前来救治。眼睛受到任何伤害时，应立即请眼科医生诊断。当化学灼伤眼睛时，应分秒必争，在医生到来前即抓紧时间，立即用蒸馏水冲洗眼睛，冲洗时须用细水流，而且不能直射眼球。

(4) 烫伤：勿用水冲洗，若皮肤未破，可用碳酸氢钠粉调成浆状敷于伤处，或在伤处抹一些黄色苦味酸溶液、烫伤药膏、万花油等；若伤处已破，可涂些紫药水或者 0.1% 的高锰酸钾溶液。

1.3 实验教学

(1) 实验准备：实验指导教师与实验技术人员应共同准备实验所需仪器设备、试样及其他实验用品。

(2) 实验试做：实验指导教师应对实验进行试做，确保实验教学能顺利开展，并填写试做记录。

(3) 实验教案：实验指导教师应认真备课，编写实验教学教案；必要时还应编写实验课讲义。

(4) 实验指导：实验开始时，实验指导教师要进行必要的安全教育，考察学生预习情况；实验中以学生为主，但教师应给予必要的指导（特别是大型精密设备）并进行巡视，以确保学生的实验操作符合安全环保要求；实验结束时，教师应对学生的实验记录和结果进行评价并签字。

(5) 实验考核：实验教学中应制定包括预习、实验态度与操作、实验数据与结果、实验报告等环节的综合考核标准。

参考文献

- [1] 邹建新. 材料科学与工程实验指导教程 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.

第2章 材料科学基础实验

2.1 实验1 金相显微镜的基本原理、金相试样制备与观察

2.1.1 实验目的

(1) 熟悉金相显微镜的原理、构造、使用和维护,为掌握金相显微分析方法打下理论和实践基础。

(2) 掌握金相试样制备技术,并利用金相显微镜进行组织观察。

2.1.2 实验原理

金相显微分析是用金相显微镜观察金属内部组织以及微小夹杂物、微裂纹和微小缺陷(这些都是用肉眼、放大镜看不见的,至少是看不清楚的),以分析判断金属材料的冶炼、加工工艺的正确性和金属材料性能的优劣。金相显微分析是材料科学中的主要研究手段之一,金相显微镜是金相分析的主要工具。

2.1.2.1 金相显微镜的构造

金相显微镜的种类和形式有很多,按光路设计的形式,金相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。金相显微镜通常由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成。目前,金相显微镜与计算机及相关分析系统连接能更方便、更快速地进行金相分析研究工作。

1. 光学系统

光学系统的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。物镜的标志一般包括如下几项:①物镜类别。国产物镜,用物镜类别的汉语拼音字头标注,如平面消色差物镜标以“PC”(平场)。西欧各国产物镜多标有物镜类别的英文名称或字头,如平面消色差物镜标以“Planachromatic”或“P”,消色差物镜标以“Achromatic”,复消色差物镜标以“Apochromatic”。②物镜的放大倍数和数值孔径。标在镜筒中央位置,并以斜线分开,如“10×/0.30”“45×/0.63”。斜线前,如“10×”“45×”为放大倍数;其后为物镜的数值孔径,如“0.30”“0.63”。③适用的机械镜筒长度。如“170”“190”“∞/0”分别表示机

械镜筒长度（即物镜座面到目镜筒顶面的距离）为 170、190、无限长。“0”表示无盖玻片。④油浸物镜标有特别标注，刻以“HI”“oil”，国产物镜标有“油”或“Y”。

2. 照明系统

照明系统主要包括光源、照明器，以及其他主要附件。

光源包括白炽灯（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。一般白炽灯适合作为中、小型显微镜上的光源使用，电压为 6~12 V，功率为 15~30 W。而氙灯通过瞬间脉冲高压点燃，一般正常工作电压为 18 V，功率为 150 W，适合作为特殊功能的观察和摄影之用。光源的照明方式主要有 4 种：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，只在投射型钨丝灯作光源时，才用这种照明方式。④平行光照明：照明的效果较差，主要用于暗场照明，各类光源均可用此照明方式。

附件主要包括孔径光栏、视场光栏和滤色片。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。视场光栏越小，图像衬度越佳。观察时应将视场光栏调至与目镜视域同样大小。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，以获得优良的图像。滤色片一般有黄色、绿色和蓝色等。

3. 机械系统

机械系统主要包括载物台、镜筒、调节螺丝和底座。载物台用于放置金相样品；镜筒用于联结物镜、目镜等部件；调节螺丝有粗调和细调螺丝，用于图像的聚焦调节；底座起支承镜体的作用。

2.1.2.2 光学显微镜成像原理

光学显微镜的成像放大部分主要由物镜和目镜两组透镜组成，通过物镜和目镜的两次放大，就能将物体放大到较高的倍数。图 2-1 为光学显微镜的放大光学原理图。物体 AB 置于物镜前，离其焦点略远处，物体的反射光线穿过物镜折射后，得到了一个放大的实像 A_1B_1 ，若此像处于目镜的焦距之内，通过目镜观察到的图像是目镜放大的虚像 A_2B_2 。

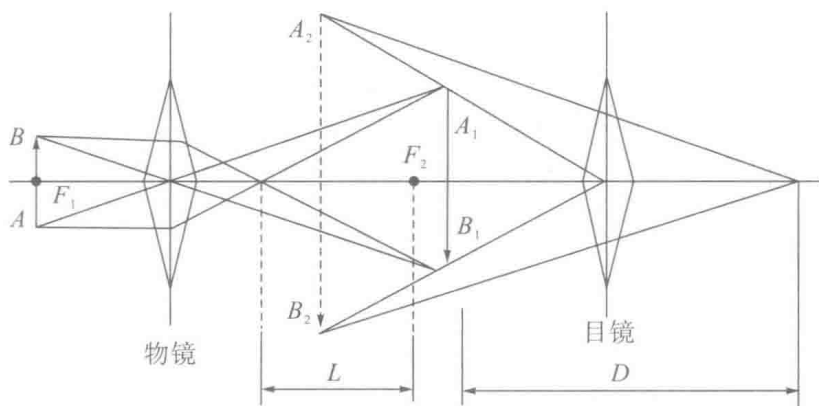


图 2-1 光学显微镜的放大光学原理图

AB —物体； A_1B_1 —物镜放大图像； A_2B_2 —目镜放大图像； F_1 —物镜的焦距；

F_2 —目镜的焦距； L —光学镜筒的长度（即物镜后焦点与目镜前焦点之间的距离）；

D —明视距离（人眼的正常明视距离为 250 mm）

2.1.2.3 光学显微镜的放大倍数

物镜的放大倍数 $M_{\text{物}} = A_1B_1/AB \approx L/F_1$ ，目镜的放大倍数 $M_{\text{目}} = A_2B_2/A_1B_1 \approx D/F_2$ ，光学显微镜总的放大倍数等于物镜的放大倍数和目镜的放大倍数的乘积：

$$M_{\text{总}} = M_{\text{物}} \times M_{\text{目}} = (L/F_1) \times (D/F_2) = (L \times 250)/(F_1 \times F_2)$$

一般金相显微镜的放大倍数最高可达 1600~2000 倍。由此可看出，因为光学镜筒长度 L 为定值，物镜的放大倍数越大，其焦距越短。在光学显微镜设计时，目镜的焦点位置与物镜放大所成的实像位置接近，并使目镜所成的最终倒立虚像在距眼睛 250 mm 处成像，这样使所成的图像看得很清楚。

光学显微镜的主要放大倍数一般通过物镜来保证，物镜的最高放大倍数可达 100 倍，目镜的最高放大倍数可达 25 倍。放大倍数分别标注在物镜和目镜的镜筒上。在用金相显微镜观察组织时，应根据组织的粗细情况，选择适当的放大倍效，以使组织细节部分能观察清楚为准，不要只追求过高的放大倍数，因为放大倍数与透镜的焦距有关，放大倍数越高，焦距越小，会带来许多缺陷。

2.1.2.4 透镜像差

透镜像差就是透镜在成像过程中，由于本身几何光学条件的限制，图像会产生变形及模糊不清的现象。透镜像差有多种，其中对图像影响最大的是球面像差、色像差和像域弯曲 3 种。显微镜成像系统的主要部件为物镜和目镜，它们都是由多片透镜按设计要求组合而成的，而物镜的质量优劣对显微镜的成像质量有很大影响。虽然在显微镜的物镜、目镜及光路系统等设计制造过程中，已将像差减少到很小的范围，但其依然存在。

(1) 球面像差。球面像差是由于透镜的表面呈球曲形，来自一点的单色光线通过透镜折射以后，中心和边缘的光线不能交于一点，靠近中心部分的光线折射角度小，在离透镜较远的位置聚焦；而靠近边缘处的光线偏折角度大，在离透镜较近的位置聚焦。所以形成了沿光轴分布的一系列的像，使图像模糊不清。这种像差称为球面像差，如图 2-2 所示。

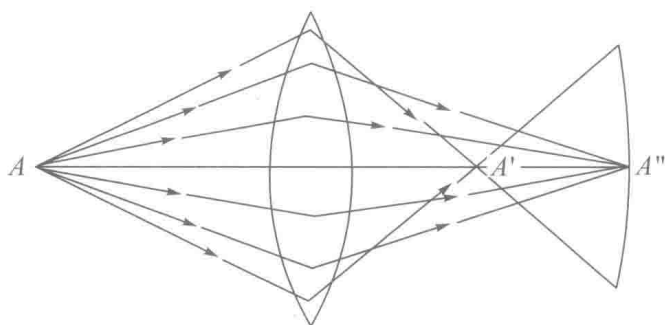


图 2-2 球面像差示意图

采用多片透镜组成透镜组，即将凸透镜与凹透镜组合形成复合透镜，产生性质相反的球面像差来减小这种像差。还可以通过加光阑的办法，缩小透镜的成像范围。因球面像差与光通过透镜的面积大小有关，在金相显微镜中，球面像差可通过改变孔径光阑的大小来减小。孔径光阑越大，通过透镜边缘的光线越多，球面像差越严重；而缩小光阑，限制边缘光线的射入，可减少球面像差；但光阑太小，显微镜的分辨能力降低，也使图像模糊。因此，应将孔径光阑调节到合适的大小。

(2) 色像差。色像差的产生是由于白光是由多种不同波长的单色光组成的，当白光通过透镜时，波长越短的光，折射率越大，其焦点越近；而波长越长，折射率越小，其焦点越远。这样一来，使不同波长的光线形成的像不能在同一点聚焦，使图像模糊，从而引起像差，即色像差，如图 2-3 所示。可采用单色光源或加有色片或使用复合透镜组来减小色像差。

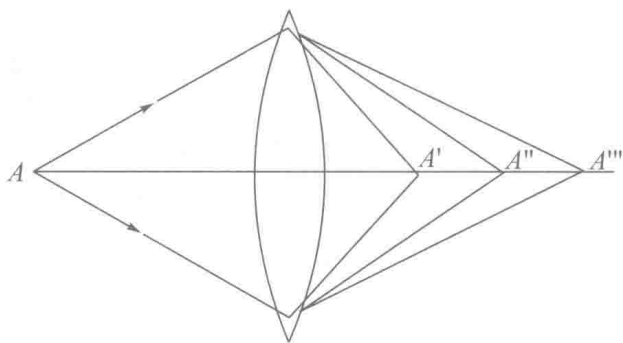


图 2-3 色像差示意图

(3) 像域弯曲。垂直于光轴的平面，通过透镜所形成的像，不是平面而是凹形的弯曲像面，称为像域弯曲，如图 2-4 所示。像域弯曲的产生，是由于各种像差综合作用的结果。一般的物镜或多或少地存在像域弯曲，只有校正极佳的物镜才能达到趋于平坦的像域。

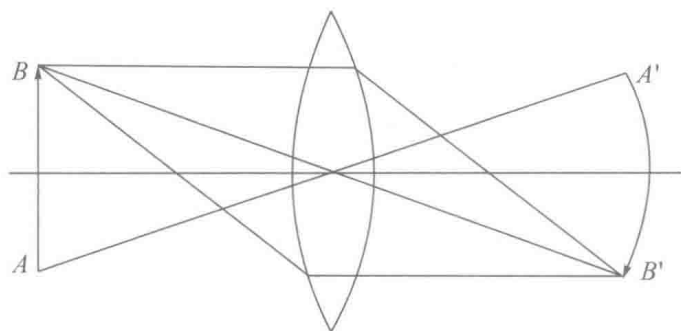


图 2-4 像域弯曲示意图

2.1.2.5 物镜的数值孔径

物镜的数值孔径用 NA 表示（即 Numerical Aperture），表示物镜的聚光能力。数值孔径大的物镜，聚光能力强，即能吸收更多的光线，使图像更加清晰。物镜的数值孔径 NA 可用公式表示为

$$NA = n \cdot \sin\varphi$$

式中 n ——物镜与样品间介质的折射率；
 φ ——通过物镜边缘的光线与物镜轴线所成的角度，即孔径半角。

可见，数值孔径的大小与物镜和样品间介质的折射率 n 的大小，以及孔径角的大小有关。

以空气为介质的称为干系物镜或干物镜，以油为介质的称为油浸系物镜或油物镜。干物镜的 $n=1$ ， $\sin\varphi$ 总小于 1，故数值孔径 NA 小于 1；油物镜如松柏油物镜的 $n = 1.52$ ，故数值孔径 NA 可大于 1。物镜的数值孔径的大小，标志着物镜分辨率的高低，即决定了显微镜分辨率的高低。

2.1.2.6 显微镜的鉴别能力（分辨率）

显微镜的鉴别能力是指显微镜对样品上最细微部分能够清晰分辨而获得图像的能力，如图 2-5 所示，它主要取决于物镜的数值孔径 NA 值大小，是显微镜的一个重要特性。通常用可辨别的样品上的两点间的最小距离 d 来表示， d 越小，表示显微镜的鉴别能力越高。

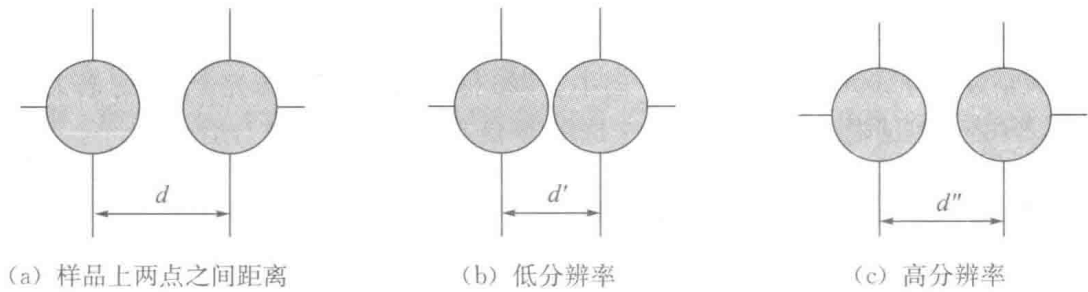


图 2-5 显微镜的分辨率

显微镜的鉴别能力可用下式表示：

$$d = \lambda / 2NA$$