

李合琴
徐光青 主编
张学斌



金属材料工程 实验教程



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

金属材料

工程

实验教程

JINSHU CAILIAO GONGCHENG
SHIYAN JIAOCHENG

主 编 李合琴 徐光青 张学斌



合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属材料工程实验教程/李合琴,徐光青,张学斌主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5650-4021-4

I. ①材… II. ①李…②徐…③张… III. ①材料科学—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TB3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 124567 号

金属材料工程实验教程

李合琴 徐光青 张学斌 主编

责任编辑	张择瑞
出版发行	合肥工业大学出版社
地 址	(230009)合肥市屯溪路 193 号
网 址	www.hfutpress.com.cn
电 话	理工编辑部:0551-62903204 市场营销部:0551-62903198
开 本	710 毫米×1000 毫米 1/16
印 张	12
字 数	228 千字
版 次	2018 年 6 月第 1 版
印 次	2018 年 7 月第 1 次印刷
印 刷	安徽昶颜包装印务有限责任公司
书 号	ISBN 978-7-5650-4021-4
定 价	30.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。



李合琴，1956年2月生，山东省德州人，合肥工业大学材料科学与工程学院教授，博士生导师。1982年1月本科毕业于合肥工业大学金属材料及热处理专业；1990年7月硕士毕业于合肥工业大学材料科学与工程学院；2002年3月博士研究生毕业于中国科学院固体物理研究所，获理学博士学位。2005年7月至2006年3月，香港城市大学超金刚石及先进薄膜研究中心高访学者；2012年7月至2013年2月，在美国马里兰大学材料科学与工程系从事新能源材料研究。主要研究方向为物理气相沉积法制备薄膜和材料的表面改性。



徐光青，1979年3月生，安徽宁国人，合肥工业大学材料科学与工程学院副教授，硕士生导师。2006年6月毕业于合肥工业大学材料学院材料学专业，获工学博士学位。2010年8月至2011年7月在澳大利亚莫纳什大学进行访问，主要研究方向为耐磨金属材料及功能纳米材料。



张学斌，1974年1月生，安徽宿州人，合肥工业大学材料学院金属材料系副研究员，硕士生导师。2005年5月毕业于中国科技大学化学与材料学院，获博士学位；2008年10月至2009年10月，澳大利亚迪肯大学访问学者。主持和参与多项国家级和省部级项目，发表论文近40篇，其中SCI、EI收录20余篇。以第一发明人获得国家发明专利10项。

前 言

本教材积极响应“十三五”国家科技创新规划：我国 2020 年进入创新型国家行列，2030 年进入创新型国家前列，2050 年成为世界科技强国，实现科技强国“三步走”。培养创新人才，既要选拔培养一批战略科学家、科技领军人才；又要弘扬工匠精神，培养大量卓越的工程师和专业技能人才；还要造就一支具有全球战略眼光和社会责任感的企业家队伍。大学工科实践教学要适应时代的变化，必须深入进行教材和教学方法的改革。目前有关材料领域的实验教材大多比较陈旧，且缺乏系统性。

金属材料科学与工程是在若干基础科学和生产实践基础上发展起来的一门科学，它的主要理论都是通过实验而建立的。如：材料合金相图虽可用热力学原理推出，但必须通过实验验证，才能得到合金在平衡条件下的成分、温度与组织之间的关系。过冷奥氏体转变曲线的建立也是通过在系列等温状态下，测试不同过冷度下得到的组织。金属材料中的合金化原理，来源于各种合金元素对相变、组织、性能的影响规律。实验不仅可使学生通过自己的实践来验证和加深对课堂理论的理解，而且可培养学生观察、分析和解决问题的能力，同时在实验中发现问题的，有利于培育学生的创新能力。实验还能培养学生严谨的工作作风和实事求是的科学态度。因此在金属材料工程课程教学中，必须充分重视实验教学。

本书是高等院校材料类专业的实验教材，全书分为六章，内容包括金相组织和微观分析、金属材料及热处理、材料力学性能、材料物理性能、粉末冶金技术等相关实验。本书既介绍了实验的基本原理，又说明了实验的操作方法，可作为金属材料工程及材料类相关专业的课程实验教材，也可供大学机械类专业本科生使用，并可供其他专业的同类课程的实验课选用以及相关专业技术人员参考。

全书六章内容包括二十四个实验，可供材料和机械类各专业选做。其中实验一到实验七由张学斌编写；实验九到实验十一、实验十三，实验二十到实验二十三由徐光青编写；实验八和实验十二、实验十四到实验十九、实验二十四由李合琴编写，并且对实验十、实验十一、实验十三进行了补充，全书由李合琴负责统稿完成。

由于编者水平有限，难免有缺误之处，殷切希望使用本书的同行和读者提出宝贵意见。

编 者

2018 年 3 月

目 录

第一章 金相组织观察和分析实验

实验一	金相显微镜的基本原理、构造和使用	(001)
实验二	金相样品制备的一般方法	(007)
实验三	铁碳合金相图及平衡组织观察	(016)
实验四	二元、三元合金组织观察	(020)
实验五	X射线衍射仪结构与工作原理, 衍射图谱与分析	(027)
实验六	透射电镜结构及工作原理, 电子衍射及衬度像	(033)
实验七	SEM 结构、EDS 结构及工作原理	(041)

第二章 金属热处理和力学性能实验

实验八	奥氏体晶粒大小的测定	(049)
实验九	碳钢的非平衡组织观察及铸铁、常用有色金属合金的显微组织分析	(059)
实验十	碳钢的热处理操作、硬度测定及合金元素对淬火钢回火稳定性的影响	(068)
实验十一	硬度试验: 硬度试验原理、方法, 各种硬度计的选用与操作方法	(073)
实验十二	缺口样品的冲击试验	(087)
实验十三	缺口样品的拉伸与裂纹效应实验	(091)

第三章 材料物理性能实验

实验十四 双电桥法测金属材料电阻 (094)

实验十五 磁性法测量钢中残余奥氏体量 (101)

实验十六 材料的差热 (DTA) 和热重 (TG) 分析实验 (107)

实验十七 膨胀法测量金属材料的膨胀系数 (117)

第四章 粉体制备和性能实验

实验十八 粉末压制成形及烧结 (121)

实验十九 粉体粒度及粉体冶金材料物理、力学性能的综合测试 (129)

第五章 材料粗糙度、磨损和电化学性能实验

实验二十 材料表面粗糙度测量 (145)

实验二十一 材料的磨损实验 (152)

实验二十二 恒电位法测定金属的腐蚀极化现象 (阳极极化曲线) (158)

实验二十三 电位扫描法测定不同介质下金属的腐蚀速度 (163)

第六章 CAD/CAM 基础实验

实验二十四 《Auto CAD 机械制图》实验 (167)

附 录

附录 I 洛氏硬度 (HRC) 与其他硬度及强度换算表 (171)

附录 II 压痕直径与布氏硬度对照表 (173)

附录 III 压痕对角线与维氏硬度对照表 (175)

附录 IV 洛氏硬度 (HRB) 与其他硬度及强度换算表 (178)

附录 V 显示钢铁材料及有色金属材料显微组织用浸蚀试剂 (183)

参考文献 (185)

第一章 金相组织观察和分析实验

实验一 金相显微镜的基本原理、构造和使用

一、实验目的

- (1) 了解普通光学显微镜的构造，各主要部件及元件的效用。
- (2) 掌握正确的使用操作规程及维护方法。

二、金相显微镜的原理及使用

1. 原理

正常人眼看物体时，最适宜的距离大约在 250mm 左右，此时，眼睛可以很好地区分物体的细微部分而不易疲劳，这个距离称为“明视距离”。物体上的两点要能被眼睛分辨清楚，必须使它们的像落在人眼视网膜的两个不同的感光细胞上，从眼睛的光心到物体两端所引的两条直线的夹角叫视角，人眼可分辨清楚的最小视角为 $2' \sim 4'$ ，在 250mm 处能分辨的最小距离约 0.15~0.30mm。为了增大视角，就在物体与眼睛间置一放大镜，其放大倍数为：

$$M = \frac{250}{f} \quad (1-1)$$

f 为放大镜的焦距，从式 (1-1) 可见， f 愈小、 M 愈大，但实际上不可能用焦距很短的放大镜来观察。透镜的曲率半径太小，眼睛所观察的范围就更小，且像差愈显著，所以放大镜一般在 20 倍以下，若要再提高放大倍数以观察更细微的物体，就必须用显微镜。显微镜通过物镜及目镜两次放大而得到倍数较高的放大像。图 1-1 是它的放大原理图。

若将试样置于物镜下方的焦点 F_1 外少许，则物镜将试样上被观察的物体（以箭头所指 WS 表示）放大，而在物镜的上方得到一个倒立的实像 W_1S_1 ，在设计显微镜时就已安排好使这个实像刚好落在目镜的焦点 F_2 以内，因而再经过目

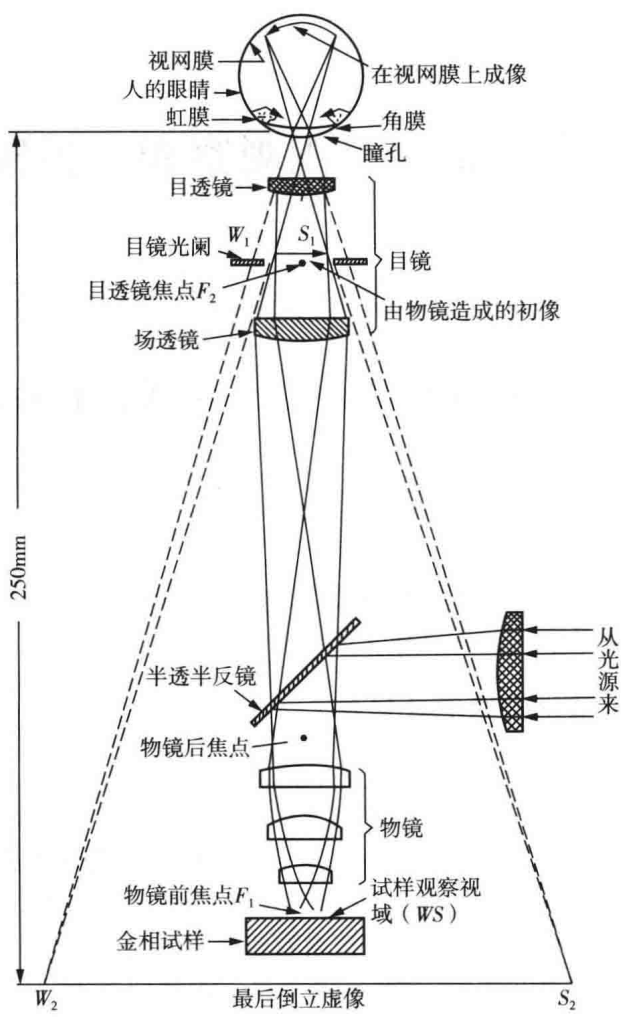


图 1-1 金相显微镜放大原理图

镜放大后，人眼在目镜上观察时，在 250mm 的明视距离处，看到一个经再次放大的虚像 W_2S_2 。所以观察到的像是经物镜和目镜两次放大的结果。总的放大倍数 M 应为物镜放大倍数 $M_{物}$ 与目镜放大倍数 $M_{目}$ 的乘积，即：

$$M=M_{物} \times M_{目} \tag{1-2}$$

2. 物镜的选择

普通光学金相显微镜主要由三个系统构成：光学系统、照明系统和机械系统。光学系统的主要构件是物镜和目镜，其任务是完成金相组织的放大，并获得清晰的图像。物镜的优劣直接影响显微镜成像的质量，因此物镜是决定显微镜的主要光学零件。衡量一个物镜性能的有：数值孔径和鉴别率、有效放大倍数、景

深度和像差校正程度。主要性能指标在物镜上有标志说明(图1-2)。图1-2中,40/0.65表示物镜40倍,数值孔径为0.65,160/0表示机械筒长为160mm的金相用物镜,“0”表示盖波片的厚度为0(即没有盖波片)。

(1) 数值孔径和鉴别率

显微镜的鉴别率主要决定于物镜的鉴别率,对于鉴别率不同的两个物镜,虽然都可以配成相同的放大倍数,但显微的效果不同,如对试样细微组织中相邻的两点,用鉴别率高的物镜可以把它们分辨开,而用鉴别率低的物镜,看到的只是连成一片的轮廓,分不开相邻的两点。

物镜的鉴别率指物镜所清晰分辨出物体相邻两点的最小距离 d ,与数值孔径 NA 有如下关系:

$$d = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1-3)$$

式(1-3)中, λ 为照明所用入射光的波长。从上式可知, NA 愈大或波长愈短,鉴别率愈高。因此,使用黄、绿、蓝等滤色片,不仅可消除一些色差,还可提高显微镜的鉴别率。滤色片与试样颜色配合恰当还可提高衬度。物镜的数值孔径(NA)表征物镜的聚光能力,是物镜的重要性质之一,增强物镜的聚光能力可提高物镜的鉴别率。它的大小主要决定于进入物镜的光线锥所张开的角度,即孔径角的大小,表示为:

$$NA = n \cdot \sin\theta \quad (1-4)$$

式(1-4)中, n 为物镜前片玻璃到试样之间的介质的折射率; θ 为孔径半角。由于 $\sin\theta$ 总是小于1,所以空气为介质的干系统物镜, $NA < 1$,目前最高可达0.95;用油作介质,可以提高物镜的聚光能力,目前最高倍的油镜($120\times$)可做到 $NA = 1.40$ 。

(2) 数值孔径与有效放大倍数

如前所述,人眼在250mm处的鉴别率为0.15~0.30mm,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0.15~0.30mm,即:

$$d = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1-5)$$

$d \times M = 0.15 \sim 0.30\text{mm}$, 而

$$M = \frac{1}{\lambda} (0.3 \sim 0.6) NA \quad (1-6)$$

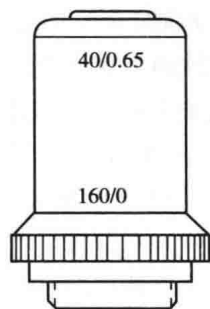


图1-2 40倍物镜

若取 $\lambda=0.55\mu\text{m}$ ，则有 $M\approx 500NA\sim 1000NA$ 。 M 称为有效放大倍数，物镜应在这两个放大倍数范围内使用。若不足 $500NA$ ，未能充分发挥物镜的功能；若大于 $1000NA$ ，只是“空虚放大”，因为不能分辨更多的细节。例如 $40\times$ 物镜的 $NA=0.65$ ，有效放大倍数为 $325\sim 650$ 倍。即使对 $NA=1.40$ 的油镜，一般只在 $1500\times$ 以下有效，这正是光学显微镜的局限性。

(3) 景深度

经腐蚀后的试样表面，显微组织是凹凸不平的。经物镜放大后，它们的像亦不会落在一个理想的平面上。物镜对这些高低不平的组织都有清晰造像的能力，称为景深度，即物镜的垂直分辨能力，它与数值孔径、放大倍数成反比。数值孔径越大，垂直分辨能力越低。此外，显微镜上的孔径光阑对景深亦有影响。

3. 目镜

目镜是用来观察由物镜所成像的放大镜。其作用是使在显微观察时，于明视距离处形成一个清晰放大的虚像；而在显微摄影时，通过投射目镜使在承影屏上得到一个放大的实像；此外，某些目镜（如补差目镜）除放大作用之外，尚能将物镜造像的残余像差予以校正。自目镜射出的光束接近平行光束，是一个小孔径、大视场系统。据此，在像差校正上轴向，像差（轴向色差、球差）可不予考虑，设计时主要考虑放大率色差，像散的消除。同时，由于入射光束接近平行，目镜的角孔径极小，故目镜本身的鉴别能力甚低，但对于物镜的初步映像的放大已是足够了。

4. 照明方式

一般金相显微镜采用灯光明照，借棱镜或其他反射在金相磨面上，靠金属自身的反射能力，部分光线被反射而进入物镜，经放大成像最终被我们所观察。图1-3为采用平行光照明系统，即灯丝像先汇聚在孔径光阑上，再成像于物镜后焦面上，经物镜射出一束平行光线投射在试样表面，其优点是照明均匀，且便于在系统中加入暗场、偏光等附件。图1-3中平行光照明由于观察目的不同，金相显微镜对试样的采光方式亦不同，据此，可分明视场照明和暗视场照明。明视场照明是金相研究中的主要采光方法，垂直照明器将来自光源的光线转向并照射在

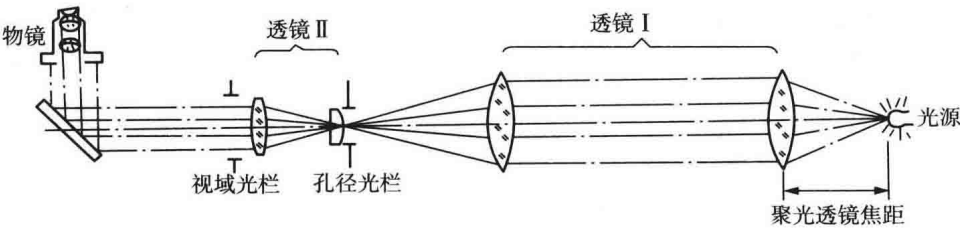


图 1-3 平行光照明

金相试样表面上,由试样表面反射的光线又经物镜、目镜成像。如果试样表面光滑如镜,那么显微镜中观察到的是明亮的一片;而反光能力差的相或产生漫散射的地区将变得灰暗。暗视场与明视场显微镜的区别在于:明视场中经垂直照明器转向后的入射光束通过物镜直射到目的物上,而暗视场则是使入射光束绕过物镜斜射于目的物上。这样的光束是靠环形光阑及环行反射镜获得的。

5. 调整和维护

(1) 光源的调整

光源的调整包括径向调整与轴向调整,前者的目的是让发光点调到仪器的光学系统的光轴上;后者主要是让灯丝通过聚光镜后汇聚在孔径光阑上,以得到“平行光照明”。光源经精确调整好以后,应达到视野照明最明亮且均匀,视野内无灯丝像的效果。

(2) 光阑的调整

在金相显微镜的照明系统中常有两个孔径可变的光阑。孔径光阑装在光源聚光透镜之后,视场光阑装在孔径光阑之后。

① 孔径光阑

孔径光阑用以控制射向物镜的入射光束的粗细。孔径光阑若开得太大,则入射光过强,增加了镜筒内部的反射与炫光,降低影像的衬度。缩小孔径光阑可避免上述弊病,且可消除由透镜边缘引起的球面像差并提高映像的景深。但若孔径光阑缩得太小,光束只通过物镜的中心部分,使实际的数值孔径减小,使物镜的分辨能力降低。因此,应按观察的要求适当调节孔径光阑的大小。一般是调到刚好使光线充满物镜的后透镜为宜,此时物镜的分辨能力最高。有人认为可以将试样调焦后,去掉目镜,观察镜筒内的光斑,以刚好充满镜筒底部的四分之三为准。一般却是以调节到观察时物像最清晰、不产生浮雕,晶界不变形、不弯曲,光的强弱使人眼舒适为原则。物镜的孔径不同,透镜组尺寸也不同,更换物镜后必须重新调节孔径光阑。

② 视场光阑

视场光阑用以改变视场大小、减小镜筒内部的反射与炫光以提高映像的衬度,而不影响物镜的分辨能力。视场光阑的调节是在显微镜调焦后,缩小视场光阑,在目镜中观察其像,然后扩大它,使其边缘正好包围整个视物。有时为了观察某一试样的局部细致组织,也可将视场光阑缩小到刚好包围此局部组织,以收到更好的效果。总之,孔径光阑与视场光阑,都是为了提高成像质量而加入光线系统中去的。通过调节这些光阑可最大限度地利用物镜的鉴别率并得到良好的衬度。

(3) 维护要点

金相显微镜是精密光学仪器,使用时必须了解其基本原理及操作规程,要认

真维护、保管，细心谨慎使用。

① 操作显微镜时双手及样品要干净，绝不允许把侵蚀剂未干的试样在显微镜下观察，以免腐蚀物镜。

② 操作时应精力集中，小心谨慎。接电源时应通过变压器，装卸或调换镜头时必须放稳后才可松手，不可粗心大意。

③ 调焦距时，应先转动粗调螺丝，使物镜尽量接近试样（目测），然后一边从目镜中观察，一边调节粗调螺丝使物镜慢慢上升直到逐渐看到组织时，再用微调螺丝调至清晰为止。

④ 显微镜的光学系统部分严禁用手或手帕等去擦，而必须用专用的驼毛刷或镜头纸轻轻擦拭。

⑤ 使用过程中，若发生故障，应立即报告老师，不得自行拆动。

三、实验内容及要求

(1) 认真观察和识别实验所用的金相显微镜的外形结构，各类元件、部件的效用和外貌特征及其标志。

(2) 练习显微镜的操作规程。正确选用物镜和目镜的匹配、光阑的调节、放大倍数的计算、目镜测微尺的使用、调焦操作、维护要点。垂直照明器的选用、滤色片的选用、暗场的使用等。

(3) 参观其他类型的金相显微镜。

四、思考题

(1) 几何光学的主要定律是什么？

(2) 光学金相显微镜在研究显微组织中的主要优缺点？

(3) 什么是实像和虚像？成像的条件？

(4) 什么是显微镜的有效放大倍数？取决于哪些因素？

(5) 透镜成像会产生哪几类主要缺陷？怎样校正？

实验二 金相样品制备的一般方法

一、实验目的

- (1) 掌握金相样品制备的一般方法（机械抛光和化学浸蚀）。
- (2) 了解金相样品制备的其他方法。

二、实验设备及材料

- (1) 金相显微镜一台；
- (2) 碳钢试样一块；
- (3) 金相砂纸一套、玻璃板一块；
- (4) 抛光机及抛光液；
- (5) 浸蚀剂、酒精、玻璃器皿、竹夹子、脱脂棉、滤纸等。

三、实验内容及程序

金相样品制备的全过程包括：试样的截取与磨平（包括细薄样品的镶嵌）、样品的磨光与抛光、样品组织的显露、显微组织的观察与记录等。本次实验的重点是掌握金相样品制备的一般方法——机械抛光和化学浸蚀，因而省略了试样的截取与磨平过程。

本次实验的具体内容及程序如下：

1. 样品的磨光

每人领取已截取并磨平的碳钢试样一块，用一套金相砂纸在玻璃板上先粗后细逐号磨光。注意每换细的砂纸时，应将样品和手冲洗干净，并将下垫的玻璃板擦干净，以防止粗砂粒掉入细砂纸上。同时将磨光方向转换 90° ，以便于观察原磨痕的消除情况。在往复移动样品时应均匀用力，用力也不宜过大。使用细一号砂纸时应完全磨去前一号砂纸遗留下来的磨痕。图 2-1 为手工磨光操作示意图。

2. 样品的抛光

磨光后的样品表面仍留有细的砂纸磨痕，还不能有效地观察浸蚀后的组织，因此必须将砂纸磨痕完全抛去，使表面达到光亮如镜的光洁度，才能满足显微观察的要求。抛光后的表面在 200 倍显微镜下观察应基本上没有磨痕和磨坑。机械抛光是常用的一种方法，在专用的金相样品抛光机上进行。在抛光机转盘上装有不同抛光用织物，用于粗抛和细抛。粗抛时用帆布，细抛时用呢料、绒布、金丝绒或绸

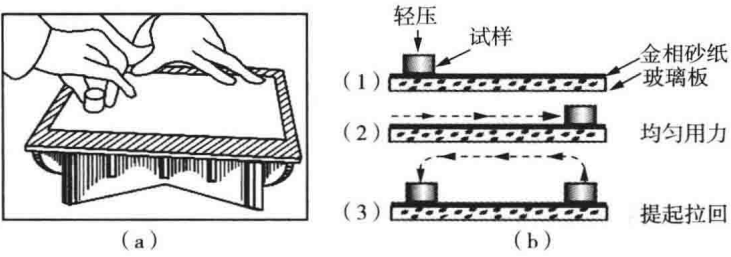


图 2-1 手工磨光操作示意图

布。粗抛时应在织物上喷洒适量的抛光用磨料（ Cr_2O_3 粉或 Al_2O_3 粉的水悬浮液）。同时，粗抛和细抛时都应不断喷洒润滑液，使样品表面保持适当的湿润度。

在抛光前应将样品的边角磨圆滑，以便保护织物不被刮破及样品飞出。

3. 显微组织的显示

抛光好的样品，直接在显微镜下观察，仅能观察到非金属夹杂物、灰口铸铁中的石墨等，而无法观察到晶界、各类相和组织。若要显露组织，必须经过适当的显露方法。化学浸蚀法是最普通的显微组织显露法，其基本原理是样品表面的不同组织（不同成分或结构的晶粒、晶界、相界等）在浸蚀液中形成微电池作用，导致溶解速度和程度不同。本次实验样品为碳钢，浸蚀液为 2%~4% 硝酸酒精。将浸蚀液和纯酒精各倒入一个玻璃器皿中，用竹夹子夹脱脂棉、蘸浸蚀液在样品表面擦拭，当光亮镜面呈浅灰白色时，立即用水冲洗，并用酒精擦洗后经吸水纸吸干。操作过程要迅速利落，以防带水样品表面在空气中氧化。严禁用手摸擦表面，以免皮肤受到伤害。

4. 显微组织的观察与记录

制备好的样品用显微镜在 100~400 倍不同放大倍数下观察组织，体会放大倍数不同对组织观察和景深的影响，绘制组织特征图，规格为 50mm×65mm 的矩形或直径为 50mm 的圆形。图下标注材料名称、热处理规程、放大倍数、浸蚀剂、样品组织等项。

四、实验要求

- (1) 用机械抛光和化学浸蚀法制备金相样品一块。
- (2) 观察试样的显微组织，并绘制组织图。
- (3) 了解金相样品的其他制备方法。

五、思考题

(1) 为什么晶界浸蚀之后是黑色的？显微镜下观察到的黑白图像一般反映什么情况？在暗视场下晶界和晶粒内各为什么颜色？