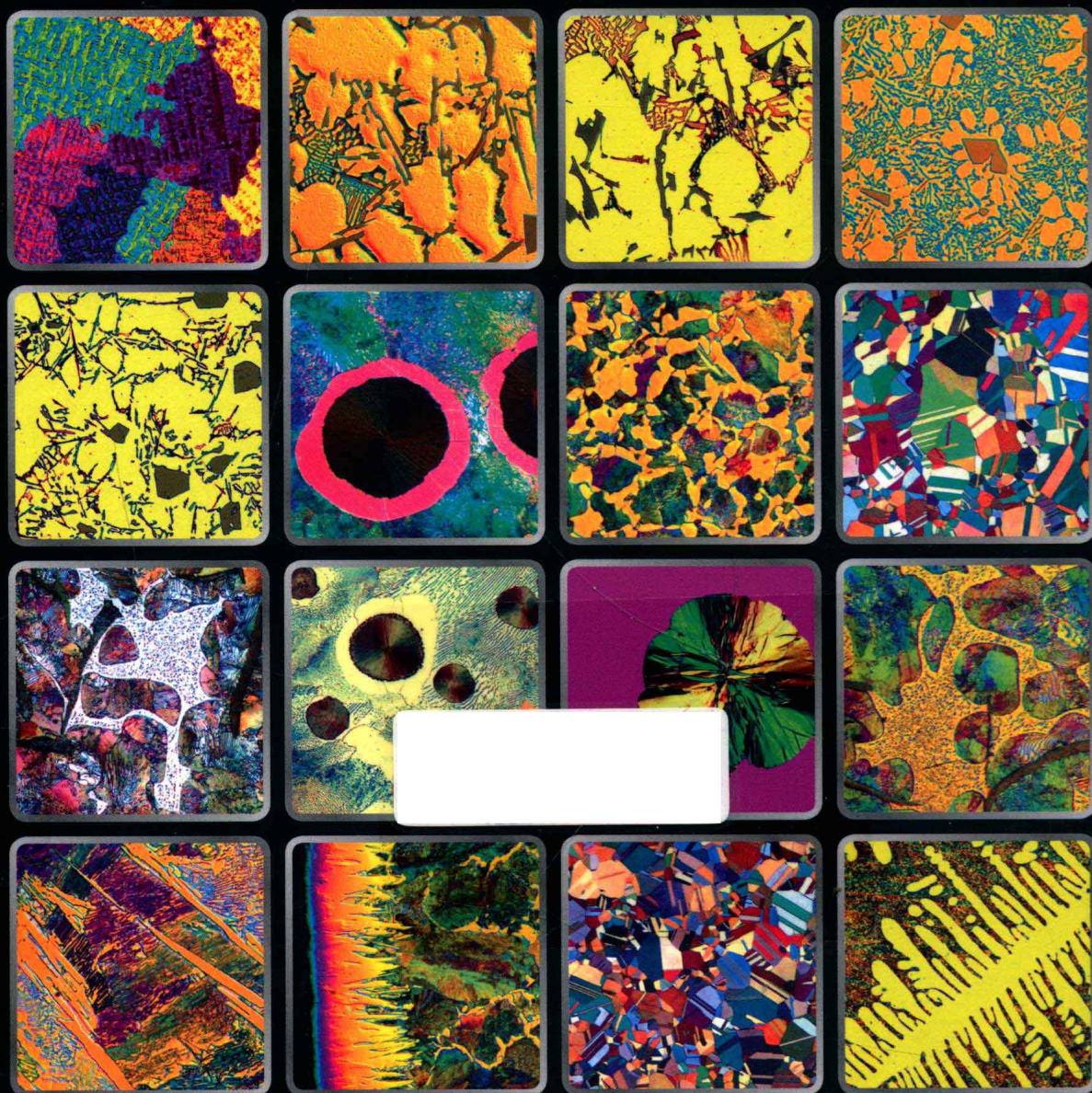


金属材料彩色金相图谱

夏建元 曾大新 张红霞 等编著



本图谱共7章：第1章介绍彩色金相成像原理；第2~6章分别介绍了结构钢、工模具钢、铸铁、表面处理材料、有色金属的彩色金相图，其中每一章的前面部分是文字说明，简要介绍该章的材料分类、处理工艺、组织特征和检验方法等与该章金相图片密切相关的共性内容，后面部分为彩色金相图片，包括图号、材料名称、浸蚀剂、处理工艺和组织说明；第7章为彩色金相“画配诗”。本图谱中所有图片均选自教学、科研和生产中常见的正常组织图片、缺陷组织图片和失效分析组织图片，共计887幅。

本书适于金相工作者、热加工工艺人员、材料生产和使用等单位的工程技术人员以及科研人员使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料彩色金相图谱/夏建元等编著.—北京：机械工业出版社，2012.10
ISBN 978-7-111-40038-7

I. ①金… II. ①夏… III. ①金属材料—彩色金相—相图 IV. ①TG113.14

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第241393号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑：季顺利 责任编辑：季顺利 吕德齐

版式设计：霍永明 责任校对：刘志文

封面设计：姚毅 责任印制：乔宇

北京汇林印务有限公司

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·33.25印张·2插页·782千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-40038-7

定价：148.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

经典金相学肇始于19世纪中叶，英国冶金学家索比在光学显微镜下观察钢铁中的珠光体组织。随着人们对钢的退火、正火、淬火和回火组织的不断研究，一门名为“金相学”的学科得以诞生，即经典光学金相。该学科涉及的主要是金属与合金的组织结构以及它们与物理、化学和力学性能间的关系。随着现代技术的发展，新材料层出不穷，金相学的范围也已不限于金属与合金，逐渐渗透到无机非金属材料、矿物，甚至高聚物材料。

从某种意义上讲，彩色金相技术起源于钢中非金属及矿物质的分析和鉴别，因为这些天然的矿物大多具有天然的固有色彩，同时还具有明显的光学各向同性和各向异性效应，因此通过观察各类夹杂物本来色彩的差别和变化，可作为鉴别钢中非金属夹杂物的依据之一，这完全是一种天然的彩色金相。早在20世纪70年代初，我国就开始利用光学金相法，观察和研究钢中非金属夹杂物的色彩和光学特征。西方国家的科研工作者利用热染法显示各种显微组织。如1947年GEInmanul用热染法显示了25-20奥氏体钢中的 σ 相。国内在20世纪60年代初期就开始对热染法进行广泛的研究。20世纪60年代末，E.Beraha和B.ShPigler等著的《彩色金相》一书，对化学腐蚀沉积干涉膜技术进行了深入系统的论述。1980年由中国金属学会举办了第二届全国金相图片展。1980年出版的《钢中非金属夹杂物图谱》一书，列举了钢中各类非金属夹杂物光学特征的彩色图片72幅。1991年出版的《彩色金相技术》分“原理及方法”和“应用图册”两部分。国内最新的彩色金相研究的著作是2002年7月由机械工业出版社出版的《铸铁彩色金相学》，作者在书中运用了大量彩色图片进行分析，并从这些彩色图片中观察到在常规金相中未能显示的结晶现象。

几十年来，一方面新型的、鉴别率更高的、功能齐全的各式金相显微镜相继问世；另一方面，针对不同类型的合金，创造了显示其内部组织的各种试剂及显示方法。但总的来说，合金组织的显示都是依靠黑白

衬度，即不同的合金组织呈现不同的灰度。但利用灰度差别来区分组织，很多情况下是不够灵敏的。尽管随着显微技术的不断进步，越来越多的研究者开始倾向于使用更先进的电子扫描显微镜和透射显微镜等，但光学金相因其操作方便、直观为广大企业和研究者所青睐，依然有一批学者在经典金相领域孜孜不倦地研究，夏建元老师正是其中非常执着的一位。

自工作以来，夏建元老师就潜心于金相学的研究，从最早手工制样、暗室胶片作业到如今的自动抛光和数码拍照，他一直乐此不疲。早在20世纪90年代，他的金相作品便在全国彩色金相图片展中获得一等奖。丰富的工程经验和执着的钻研精神，使他在金相学领域取得了骄人的成绩，被东风汽车公司聘为有特殊贡献的专家。从工厂退休之后，他依然割舍不下自己所热爱的金相事业，继续潜心于彩色金相的研究，并与时俱进学习计算机技术，将计算机彩色金相发展到一个很高的水平。

本图谱是夏建元老师的毕生心血所得，图片是从夏建元老师几十年来在科研和日常检测中拍摄的几千张图片中精选出来的，由湖北汽车工业学院的曾大新、张红霞、赵红利、罗成、饶晓晓和王天国等老师协助编辑而成，图片的制作有的采用传统的热染法，有的采用计算机彩色成像。图片颜色对比鲜明，组织清晰，图案精美。本图谱是在彩色金相领域关于金属材料金相组织方面的较完善的学习资料，我们希望本图谱的出版，能对广大的金相工作者提供有力的帮助。

本图谱第1章由赵红利编写，第2、3章由夏建元、饶晓晓编写，第4章由夏建元、张红霞编写，第5章由夏建元、罗成编写，第6章由夏建元、王天国编写，第7章由张红霞、曾大新编写。

本图谱在试样收集、制作和编写过程中得到了东风汽车公司工艺所和各专业厂的同仁，以及湖北汽车工业学院的领导和老师的大力支持，在此谨向各单位和各位同仁致以深深的谢意。

由于水平和能力所限，难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

编者

目 录

前言

第1章 彩色金相成像原理.....	1
1.1 金相试样的制备.....	1
1.1.1 塑性材料金相试样制备.....	1
1.1.2 脆性材料金相试样制备.....	3
1.1.3 铸铁材料金相试样制备.....	3
1.1.4 硬质合金金相试样制备.....	4
1.1.5 复合材料金相试样制备.....	4
1.2 金相试样显微组织的显示.....	4
1.2.1 常规显示组织的方法.....	6
1.2.2 特殊显示组织的方法.....	10
1.2.3 彩色金相技术的光学法.....	20
1.3 金相显微摄影与图像分析.....	23
1.3.1 显微摄影的技术要点.....	23
1.3.2 数码照相系统.....	24
1.3.3 数码显微摄影与图像分析.....	25
第2章 结构钢彩色金相图.....	28
2.1 概述.....	28
2.2 工业纯铁与低碳变形钢.....	29
2.3 低中碳碳素结构钢与低中碳合金结构钢.....	47
2.4 弹簧钢.....	104
2.5 滚动轴承钢.....	111
第3章 工模具钢彩色金相图.....	117
3.1 碳素工具钢.....	117
3.2 低合金工具钢.....	167
3.2.1 铬钢.....	167
3.2.2 硅铬钢.....	167
3.2.3 铬钨钢.....	167
3.2.4 铬钨锰钢.....	167
3.2.5 锰钒钢.....	167
3.3 高速工具钢.....	178
3.3.1 高速工具钢的特点.....	178
3.3.2 高速工具钢的分类.....	178
3.4 冷作模具钢.....	218

3.5 热作模具钢.....	234
第4章 铸铁彩色金相图.....	245
4.1 概述.....	245
4.1.1 铸铁的特点及应用.....	245
4.1.2 铸铁的分类.....	246
4.1.3 铸铁的常见组织类型.....	246
4.2 白口铸铁.....	247
4.2.1 白口铸铁的类型.....	247
4.2.2 合金元素对铸铁白口化的影响.....	247
4.2.3 白口铸铁的组织 and 性能.....	248
4.3 灰铸铁.....	256
4.3.1 灰铸铁的牌号和性能.....	256
4.3.2 灰铸铁的基本组织.....	256
4.4 球墨铸铁.....	325
4.4.1 球墨铸铁的牌号和性能.....	325
4.4.2 球墨铸铁的基本组织.....	326
4.5 蠕墨铸铁.....	385
4.5.1 蠕墨铸铁的牌号和性能.....	385
4.5.2 蠕墨铸铁的结构特征和组织.....	385
4.6 可锻铸铁.....	399
4.6.1 可锻铸铁的牌号和性能.....	399
4.6.2 可锻铸铁的石墨形态.....	399
4.6.3 可锻铸铁的分类及组织.....	400
第5章 表面处理材料彩色金相图.....	408
5.1 概述.....	408
5.2 钢铁表面渗非金属.....	409
5.3 钢铁表面渗金属.....	427
5.4 表面涂敷.....	438
第6章 有色金属彩色金相图.....	451
6.1 铸造铝合金.....	451
6.1.1 铸造铝合金的分类.....	451
6.1.2 铸造铝合金的热处理.....	454
6.2 铜合金.....	470
6.2.1 黄铜.....	470
6.2.2 青铜.....	471
6.2.3 白铜.....	472
6.3 轴承合金.....	483
6.3.1 轴承合金的性能要求与组织.....	483
6.3.2 轴承合金的类型及应用.....	483
第7章 彩色金相画配诗.....	493
参考文献.....	525

第 1 章

彩色金相成像原理

1.1 金相试样的制备

有色金属、硬质合金、复合材料以及脆性材料等，它们的金相试样的制备各有特点。

1.1.1 塑性材料金相试样制备

习惯上把钢铁及锰以外的金属材料称为有色金属材料或非铁金属材料。这些材料包括的种类繁多，性能差异很大。有极活泼的金属Na等，有极软的金属Pb等，有极脆的材料Sb和Ge等，有放射性材料U等，也有常温为液体的金属Hg。对这些材料，按常规方法制备金相试样是很困难的，有的甚至是不可能的。遇到要制备这些特殊金属及其合金的试样时，通常的做法是：首先查出它们在周期表中的位置和性能以及它们的合金相的特点；然后按照我们所掌握的金相制样的基本知识，参考已知相似的金属材料，设计该材料的制样过程和特殊设备，进行试验。这样就能逐步有效地解决问题。

工业上广泛应用的有色金属材料具有较好的塑性，金相制样时容易产生变形扰动层。下面简要介绍塑性较好的，且金相试样制备上又有特点的金属材料金相试样的制备。

1.1.1.1 铜及其合金

从成分和组织上把这类金属材料分成三组：①纯铜或含有少量合金元素的铜合金；②含合金元素较高的，但是在 α 固溶体的极限范围内，特别是含合金元素达极限浓度的合金，例如 α 黄铜；③含合金元素更高的合金，如 β 相合金、 $\alpha+\beta$ 两相合金以及多相的复杂合金。这三组金属材料中，第①与第②两组归纳为一类，它们的特点是单相、比较软且韧（硬度大约为25~70HV）。可以参照常规的方法制备金相试样，但在磨光和抛光时，磨料残留物易卷入试样表面，而且易形成变形扰动层，制样时应予以重视。最后用浸蚀和抛光交替的操作方法或用化学机械复合抛光法可以得到好的结果。

第③组的铜合金硬度高，制样可按常规方法进行。

1.1.1.2 铝及其合金

这一类材料可分为三组：①高纯铝及含有微量合金元素的铝合金，这组材料是软的，特别在退火状态下；②含合金元素量较高，在热处理条件下使用，硬度较高，即使在退火状态下，也具有中等的硬度；③合金元素含量高，包含有较大体积分数的金属间化合物。

第①组材料，金相试样较难制备，在磨光和抛光时，磨料碎片易卷入试样表面，表面易形成变形扰动层。根据经验按下列顺序操作，可以得到好的结果，具体步骤如下：

1) SiC砂布湿磨到粒度600号或者砂布涂蜡干磨到粒度600号。

2) 用金刚石研磨膏（粒度 $7\mu\text{m}$ ），在短毛细软呢绒上抛光。

3) 用120mL热蒸馏水，20mL5%（质量分数）酒石酸铵水溶液加1g MgO微粉制成悬浮液，抛光1~5min。悬浮液在使用前应用尼龙或细密的棉纱布过滤。含铜的试样与不含铜的试样不应该在同一抛光织物上抛光，以免发生黑色沉淀。

用电解抛光或化学抛光时，试样最好先用 $7\mu\text{m}$ 的金刚石研磨膏粗抛光。浸蚀振动抛光能得到最好的效果。

中等硬度的铝合金，相对来说金相试样较易制备，应用常规的制备方法，小心地操作，会得到满意的效果。

含有比较多的金属间化合物的铝合金，多半是铸造铝合金。制备这类试样时，主要保证不出现严重的浮雕现象。

1.1.1.3 锌及其合金

锌和镉稍有变形即产生形变孪晶，所以切割、磨光以及抛光过程必须给予充分的注意。切割试样时表面层较薄的部分形成形变孪晶，为了消除这一层组织的变化，切割试样的表面至少要去掉1.5mm的扰动层，同时也应防止过热。从高纯度的锌到商业用的锌，其标准的再结晶温度较低，为从室温到 100°C 之间，所以要用铸造塑料冷镶，以避免热镶嵌引起再结晶退火导致组织变化。

要得到好的锌试样，可按下列几点操作：

1) 切割好的试样，在SiC砂布上湿磨到粒度600号或者砂布上涂蜡干磨到粒度600号，要保证磨去足够的厚度。

2) 如果试样是用显微切片机（精细的金刚石或渗碳体刀片）切取的，则可直接进行抛光。

3) 在短毛细软呢绒上用金刚石研磨膏（粒度为 $7\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 和 $1\mu\text{m}$ ，必要时还可以用 $0.25\mu\text{m}$ ）或氧化铝糊浆抛光。

4) 用120mL热蒸馏水、20mL5%（质量分数）酒石酸铵水溶液和1gMgO微粉制成的溶液最后抛光，使用前此溶液用尼龙或细密的棉纱布过滤。

为了消除磨光带来的变形扰动层，可以进行预抛光，在软呢绒上用氧化铝糊浆加肥皂液抛光。也可以应用浸蚀—机械抛光交替进行操作。所用的浸蚀剂是100mL蒸馏水、20g CrO和1.5g Na_2SO_4 的溶液。浸蚀3.5min， $7\mu\text{m}$ 金刚石研磨膏机械抛光4min；浸蚀1.5min， $3\mu\text{m}$ 金刚石研磨膏抛光6min；浸蚀30s， $1\mu\text{m}$ 金刚石研磨膏抛光8min；浸蚀10s， $0.25\mu\text{m}$ 金刚石研磨膏抛光10min；浸蚀5s，用 $0.05\mu\text{m}$ 氧化铝最后抛光，这样能得到无变形扰动层的高质量的光面。

镀锌板抛光时，抛光液的pH值应控制在7左右，把化学影响减小到最低，不使镀层污染和浸蚀。

最普遍应用的锌基合金是铸模用的锌铝合金 [$w(\text{Al})=4\%$]，试样一般容易制备，制备过程出现的缺陷较少。

1.1.1.4 铅、锡及其合金

这是一类很软的材料，硬度极低（ $\text{HV}<10$ ），熔点很低。主要包括铅（4HV）、锡（6HV）

及其含微量元素的合金。这些材料在制备金相试样过程中，很容易出现下列缺陷：

- 1) 车削和研磨时，产生深的变形扰动层。当温度超过室温时，由于变形会出现再结晶，合金也会出现沉淀。这样就使组织改变。
- 2) 磨光和抛光时，磨料碎片极易嵌入磨面。
- 3) 由于极软，单纯用机械抛光要得到无变形扰动层、无划痕的抛光面是比较困难的。

针对上述情况，制备试样时应注意减少变形和充分冷却。用铸造塑料冷镶。磨光时在SiC砂布上涂以蜡，用力要轻，磨光到粒度600号。粗抛光时用金刚石研磨膏或氧化铝糊浆。细抛光时对于硬度<5HV的铅来说，不宜用MgO微粉而需要Al₂O₃微粉。若用MgO抛光，表面上会出现成串的球状刻痕。抛光过程表面出现晦暗的情况下，宜用每1L蒸馏水加1g醋酸铵的水溶液，在细软呢绒上低速（200~300r/min）抛光。抛光后用蒸馏水拭洗。若用自来水拭洗，有时会产生暗黑色表面。

锡及其合金金相试样的制备，相对铅来说比较容易。用前述第一组铝合金的制备法可以得到满意的效果。

铅、锡金属材料，如果用显微切片机（用精细锋锐金刚石或渗碳体刀片）截取试样，可以直接进行抛光，甚至可以直接浸蚀即进行观察。

1.1.2 脆性材料金相试样制备

有些金属或半金属材料是脆的，但硬度并不特别高（<1000HV）。这些材料包括半导体和一些化合物，如氧化物、硫化物、硅酸盐等。这些材料金相试样的制备有其独特之处，切割磨光操作不同于一般的韧性材料，而抛光操作多半是相同的。一般认为按下列操作进行，可以得到好的磨面。

- 1) 脆性材料，特别是易于发生解理的材料，希望用松散磨料滚压磨光，而不希望用固定磨料的砂布磨光。前者是将磨料糊浆置于玻璃板上，试样在其上移动磨光，磨削速度快，而且表面所产生的脆裂纹缺陷层浅薄。所用磨料是Al₂O₃粉或SiC粉，粒度号可按砂布的级别选用240号、320号和400号。

- 2) 当磨光到最后步骤时，用固定磨料的蜡盘来磨光，这样能保证将脆裂纹缺陷减少，甚至消除。细磨光所用石蜡盘配料是：软化点为80~90℃的硬石蜡100g；氧化铝磨料（10~20μm）300g。

- 3) 将磨光后的试样清洗干净，进行粗抛。粗抛用无毛的织物（如粗斜纹布、帆布等），6μm或7μm的金刚石研磨膏。最好抛光到脆裂纹缺陷完全去掉为止。

- 4) 最后的抛光最好用0.2μm级别的金金刚石研磨膏，在细软短毛呢绒或人造软羔皮上进行抛光。

这种材料，也像韧性材料一样，抛光时也会有划痕出现。细抛光应消除这种痕迹，否则浸蚀时，特别是显示位错蚀坑时，一般看不见的、细微的划痕也会扩大显示出来。

1.1.3 铸铁材料金相试样制备

这里所指的铸铁是指组织中含有石墨的铸铁，包含灰铸铁、球墨铸铁和可锻铸铁。由于石墨是软而脆的相，一般制样过程中如不小心，很容易剥落，形成曳尾和穴孔。穴孔扩

大，使石墨级别的判定失真，所以制备铸铁的金相试样时，应充分给予注意。

石墨的剥落主要在抛光阶段，为此将磨光试样在帆布或尼龙上用 $10\sim 1\mu\text{m}$ 金刚石研磨膏粗抛；然后，在无毛或短软毛呢绒上用 MgO 微粉抛光即可。

实践证明，虽然用无毛呢绒抛光石墨不易剥落，但有时基体容易划伤，建议用丝绒（或天鹅绒）织物，使用前用清水洗干净，先用旧金相试样在丝绒织物上抛光 $2\sim 3\text{min}$ ，使丝绒的毛绒压倒，然后把 MgO 糊浆涂在丝绒上抛光，这样丝绒的作用就如无毛呢绒织物，适合抛光粗大石墨的铸件，特别是黑心可锻铸铁。

为了防止磨光时石墨剥落，有人在制备球墨铸铁试样时，在粗抛光机（转速低，约为 300r/min ）的帆布上涂以石蜡熔注的各种粒度金刚砂（ SiC ）磨料，以代替砂布磨光。磨光时试样应转动以免形成曳尾现象。熔制石蜡磨料的配方为（质量分数）：石蜡为 20% ，硬脂酸为 20% ，金钢砂（ SiC ）为 60% 。先将石蜡及硬脂酸放入 500mL 的烧杯中，加热到 $100\sim 200^\circ\text{C}$ 时，将所需粒度的金刚砂放入，搅拌均匀，然后浇注成块状研磨剂。应用时将浇注的各种粒度研磨剂涂在磨盘的帆布上，并滴适当的煤油加以润滑。这样磨光速度快、效果好。

为了防止磨光时石墨的剥落，也有采用在砂布上涂以石蜡，滴上煤油润滑的方法来制备试样。

1.1.4 硬质合金金相试样制备

烧结制成的硬质合金，组织中包含有特别硬的碳化物和软的钴相，这样试样制备就变得困难了。按一般习惯方法制备，很容易出现浮雕。

这种试样的制备，初磨在 SiC 水冷砂轮上进行；然后在刨平滑的竖纹理的硬木轮上，涂以金刚石研磨膏磨光，磨料的粒度最好是 $30\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 和 $7\mu\text{m}$ ；随后用金刚石研磨膏在呢绒织物上抛光，研磨膏的粒度是 $3\mu\text{m}$ 或 $1\mu\text{m}$ ；最后用 $0.25\mu\text{m}$ 粒度的研磨膏抛光。

为了避免抛光出现浮雕，抛光织物用短毛细软呢绒。 Al_2O_3 磨料也是不常用的，因为 Al_2O_3 磨料的硬度小于硬质合金中碳化物的硬度，用它作硬质合金的磨料，显然会出现浮雕。

1.1.5 复合材料金相试样制备

复合材料是特殊的多相材料，它们有优良的性能，这些材料的试样制备与传统的多相材料，如简单的共晶相相比，更需要小心谨慎。

这些材料制备试样时，遇到的严重问题是各相的硬度差别大。在这种情况下，推荐用金刚石磨料。金刚石磨料不管软相或硬相几乎都能快速地磨削，因此各相之间浮雕降低到最小。用树脂或金属粘结金刚石粉的磨轮磨光，用金刚石研磨膏在无毛或短毛呢绒上抛光，可得到好的效果。

由于相的差异性大，这种材料一般不采用电解抛光或化学抛光。

1.2 金相试样显微组织的显示

抛光好的金相试样，要得到有关显微组织的信息，还必须经过组织的显示。长期以来习惯地把这一步操作称为浸蚀或腐蚀，这是经典的化学浸蚀显示组织的延续。目前显示组

织的方法很多，浸蚀一词远不能概括，但是多数情况下仍把浸蚀作为显示组织的同义语不加区分地来应用。

未经浸蚀的金相试样，其组织组成的反光能力差别大于10%者才能明显地区分开来。例如，钢中的非金属夹杂物、铸铁中的石墨等，不经浸蚀就能在光学显微镜下检验评级。多数情况下，抛光的金相试样，不经浸蚀，就不显示其显微组织，这是由于组织组成的反光能力差别小，入射光均匀地被反射，人的眼睛不能区分其组织组成。

要使人眼能识别抛光金相试样中的各种相或组成，必须采用各种方法来显示组织，使相或组成物间的衬度增大。

表1-1给出了钢及铸铁中的组织的形态特征，表1-2为铝合金中常见组织的形态特征，表1-3为铜合金中常见组织的形态特征。通常要根据材料和组织的不同，选择不同的显示组织的方法。

表1-1 钢及铸铁中组织的形态特征

名称	形态特征
铁素体	碳(还有少量硅)溶于 α -Fe中的固溶体，常分布于石墨周围。在球墨铸铁中，以牛眼状、网状和破碎状等形态存在。在硝酸酒精溶液中浸蚀后，呈黄白色，可显示晶界
渗碳体或碳化物	铁和碳的化合物，其化学式为 Fe_3C 。按形成原因和形态分类有：初晶、共晶、二次、共析和三次渗碳体等形态。加入合金元素后，可形成合金渗碳体和碳化物，硝酸酒精溶液浸蚀后呈白亮色，碱性苦味酸钠的溶液浸蚀后呈棕色
珠光体	铁素体与渗碳体组成的机械混合物，可分为片状和粒状两种。前者铁素体和渗碳体呈交替的层片状排列，后者渗碳体以颗粒状分布于铁素体内，弥散度较高，需在较高倍显微镜下才能分辨层片状和粒状结构
莱氏体	共晶渗碳体和共晶奥氏体组成的机械混合物，呈蜂窝状。室温时，由渗碳体和奥氏体分解产物组成
磷共晶	二元共晶由 Fe_3P 和奥氏体组成，三元磷共晶由 Fe_3P 、 Fe_3C 和奥氏体组成。为边界向内凹陷的多边形，大多分布于共晶团的交界处。硝酸酒精浸蚀后，二元磷共晶是白色的 Fe_3P 上分布着奥氏体的分解物；三元磷共晶为白色的 Fe_3P 基体上分布白色针状 Fe_3C 和奥氏体的分解产物
上贝氏体	呈羽毛状。此组织由条片状铁素体和条片状奥氏体交替组成，条片状较弯曲且呈分枝，无碳化物。在球墨铸铁中，上贝氏体伴有大量残留奥氏体(体积分数为20%~40%)，故称之为奥氏体-贝氏体球墨铸铁。在硝酸酒精溶液中浸蚀速度较缓慢
下贝氏体	呈交叉分布的细针状。是碳在 α -Fe中的过饱和固溶体，在 α -Fe针叶内部，碳化物沿特定的位向析出。在硝酸酒精溶液中浸蚀速度较快
马氏体	分低碳和高碳马氏体两种。前者呈短而粗的针状，针叶较钝，亚结构为密度很高的位错，故称为位错马氏体；后者呈针状或者竹叶状，具有中脊线，亚结构主要为细小的孪晶，故又称孪晶马氏体

表1-2 铝合金中常见组织的形态特征

名称	形态特征
α 相	以铝为溶剂的固溶体，呈亮色树枝状
Si相	初生Si为多面体状，(α +Si)共晶组织中的Si，未经变质处理呈针状，变质处理后呈粒状，均为灰色
Mg_2Si 相	与 α 形成共晶的 Mg_2Si 相，呈鱼骨状，亮灰色，抛光染色处理会呈蓝色
S (AlCuMg)相	呈密集点状，黄灰色
AlCu相	与 α 形成共晶的 Al_2Cu 相，呈湖泊状，亮色，并具有微弱的玫瑰色
AlSiMnFe相	呈骨骼状，浅灰色

表1-3 铜合金中常见组织的形态特征

名称	形态特征
α 相	α 相是面心立方晶格，塑性很好。是锌、锡等元素在铜中的固溶体，呈亮色树枝状
β 相	黄铜中是以电子化合物 Cu_5Zn_8 为溶剂的固溶体，具有体心立方晶格，塑性极好。铸态冷却较快时， α 枝晶间出现小黑点或小黑块的 β 相。青铜中以 Cu_5Sn 为溶剂的固溶体，具有体心立方晶格
β' 相	温度降低时，由 β 相有序转变而来。脆性很大
δ	复杂立方晶格，硬而脆， Cu_31Sn_8 化合物为基的固溶体，锡青铜中常以 $(\alpha+\delta)$ 共析体存在。
γ	黄铜中是以电子化合物 Cu_5Zn_8 为溶剂的固溶体，具有复杂立方晶格，青铜中以 Cu_5Sn 为溶剂的固溶体，具有体心立方晶格， (Cu, Sn) 化合物为溶剂的固溶体，具有面心立方晶格
Cu_2S 相	硫与铜形成的化合物，又以 $(\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{S})$ 共晶态存在于晶界，抛光后明场下呈蓝灰色。腐蚀剂作用下无变化
Cu_2O 相	氧在铜中主要以脆性化合物 Cu_2O 存在，铸态时与铜组成 $(\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O})$ 共晶体，分布在铜晶界上。轧制、退火成材后呈孤立颗粒分布在铜基体上。经抛光后明场下呈蓝灰色。经高氯化铁盐酸浸蚀后颜色变暗

显示组织的方法很多，根据对抛光表面改变的情况，归纳为光学法、化学法（或电化学法）和物理法。光学法是基于Kohler照明的原理，借助于显微镜上某些特殊装置，应用一定的照明方式显示组织，包括暗场、偏光、干涉和相衬。应用光学法显示组织，显然有很大优点。化学法显示组织包括有化学或电化学浸蚀、电解浸蚀、恒电位浸蚀、化学染色及热染色等。化学法除恒电位法外，其他几种方法都是简便易行的，是一般金相检验工作者经常应用的方法。但是重演性较差，要正确地显示好组织需要有足够的经验并小心谨慎地操作。物理法显示组织包括阴极真空浸蚀、真空沉积镀膜和溅射沉积镀膜等。下面就以常规的显示法和特殊显示法来分别讨论。

1.2.1 常规显示组织的方法

日常，在实验室普遍而经常应用的显示组织的方法，主要有化学浸蚀和电解浸蚀等。

1.2.1.1 化学浸蚀

1. 化学浸蚀的原理

化学浸蚀是试样表面化学溶解或电化学溶解的过程。纯粹的化学溶解是很少的。一般纯金属和均匀的单相合金的浸蚀主要是化学溶解过程；两相或多相合金的浸蚀主要是电化学溶解过程。据此，我们来讨论化学浸蚀显示组织的过程。

(1) 纯金属与单相合金的浸蚀 当把抛光后的试样与浸蚀试剂接触时，首先抛光面上残留的变形扰动层被溶解掉，紧接着就是真实组织开始浸蚀显现。纯金属与单相合金的显微组织是由许多位向不同的晶粒组成的，晶粒之间存在着晶粒边界。与晶粒不同，晶粒边界原子排列的规则性差，自由能高，因而快速地被腐蚀掉，形成沟凹，晶粒本身浸蚀轻微，如图1-1a所示。这时纯金属或单相合金显示出多边形晶粒，通常认为浸蚀到这个程度就合适了。但是有些纯金属和均匀的单相合金，能够完整地、清晰地显示晶粒边界，也并不是一蹴而成的，往往需要延长长时间或反复浸蚀。这样浸蚀的结果，如图1-1b所示，除晶粒边界完整显示外，各个晶粒由于位向不同，溶解程度不同，在垂直光线的照明下，清晰地显示明暗不同的晶粒。

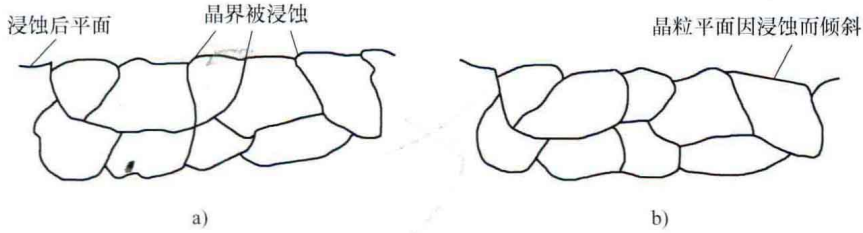


图1-1 纯金属及单相合金的化学浸蚀过程示意图
a) 晶界浸蚀 b) 晶粒浸蚀

各个晶粒中金属原子的溶解多是沿着原子排列密度最大的晶面进行，由于试样抛光面上每个晶粒原子排列的位向不同，所以每个晶粒溶解的速度并不一致，浸蚀以后原子排列密度最大的面露出表面，也就是说每个晶粒浸蚀后显露出来的晶面相对于原来的抛光面倾斜了一定角度。这就是在垂直光线下，晶粒显示明暗不同的原因。

(2) 两相合金的浸蚀 两相合金的浸蚀主要是电化学浸蚀过程。不同的相由于成分结构的不同，具有不同的电极电位，在浸蚀液中形成了许多微电池作用，具有负电极电位的相为阳极，浸蚀时发生溶解，抛光面上的这些微区变得低凹粗糙；具有正电极电位的相为阴极，基本不受浸蚀，抛光面上的这些微区保持光滑平坦，如图1-2所示。图1-2a在光学显微镜下显示暗色，而图1-2b则显示亮白色。

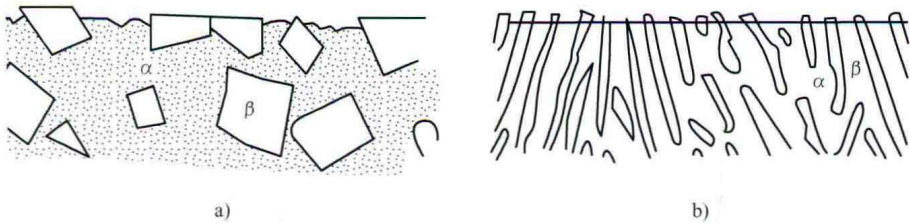


图1-2 两相合金浸蚀示意图
a) $w(\text{Sb})=20\%$ 的Sn-Sb合金 b) $w(\text{C})=0.77\%$ 的铁碳合金

由于电化学作用，浸蚀速度极快，同一合金系作为阳极相的电化学浸蚀速度，远远大于同一相化学浸蚀时的溶解速度。例如，碳钢珠光体中的铁素体，在硝酸酒精中浸蚀数秒钟，即发生铁素体溶解而显示珠光体组织，而在工业纯铁中的铁素体，显示其晶粒组织需要较长的时间。两相合金的浸蚀速度，主要决定于两相电位差的大小。电位差大，则浸蚀速度快；电位差小，则浸蚀速度慢。不同合金系，同样是两相组织，电位差不同，阳极相溶解的程度不同，在显微镜下呈现不同的情况。例如 $w(\text{C})=0.77\%$ 的铁碳合金，共析反应形成铁素体与渗碳体片层相间的组织，浸蚀后，其中铁素体具有较负的电位，在硝酸酒精中正常浸蚀的情况下，铁素体被溶解得并不很多，相内均匀地溶解掉一层，相界面处溶解量大，形成较深的沟凹，如图1-2b所示。这样在高倍显微镜下，只能看到在渗碳体的四周有一圈黑线包围着，显示两相存在。亮的基体是铁素体，亮的白线是渗碳体，而黑线则是两相界面处被浸蚀下去的铁素体。如果用低倍显微镜观察，只能看出一条黑线，这条黑线包括有渗碳体相和两边的界线。粗略地说，这条黑线表示渗碳体，但绝不能说成渗碳体被浸蚀后呈黑色。如果使用更低倍的显微镜，它的物镜的分辨率小于珠光体片层间距，所看到的珠光体组织是一团暗黑，分辨不出来片层组织。这当然也不能笼统地说成是珠光体被浸

蚀成严重凹洼的结果。

对两相合金进行浸蚀操作时，应当考虑到相的相对量、相的大小、弥散程度以及物镜的鉴别率等。对于组成相细小、分布弥散的两相合金，浸蚀过深则不能清晰地显示两相组织。如果进行高倍观察则要求浸蚀浅一点，反之，如果进行低倍观察则可浸蚀深一些。

(3) 多相合金的浸蚀 在一般情况下，多相合金的浸蚀同样也是电化学溶解的过程，但是多相合金电化学溶解过程，远比两相合金的电化学溶解过程复杂得多，很难在一种试剂中清晰地显示出各种相。与两相合金相似，浸蚀后在显微镜下通常只显示黑白两种色彩。这是由于多相合金浸蚀时，负电位的各相都发生溶解，而只有正电位最高的一相未被浸蚀的结果。在这种情况下，鉴别各种相只能根据有关的金相知识和实践经验，从形状特征上加以区别。但本书中的彩色金相图片可以从色彩等方面更丰富的反映多相的信息。

2. 化学浸蚀剂

浸蚀剂是为显示金相组织用的特定的化学试剂。由于对化学浸蚀原理了解得不够，多数的浸蚀剂是实际试验中总结归纳出来的。各种金属和合金的浸蚀剂组成、用途和使用说明见表1-4。

表1-4 金相组织显示中常用的浸蚀剂组成、用途和使用说明

序 号	组 成	用途及使用说明
1	硝酸0.5~0.6mL 乙醇96~99mL	显示钢及铸铁基体组织。浸蚀时间为数秒至1min，对于高弥散度组织，可用低浓度溶液浸蚀，减慢腐蚀速度，提高组织的清晰度
2	苦味酸3~5g 无水乙醇100mL	显示钢及铸铁基体组织，腐蚀速度较缓慢，浸蚀时间为数秒至数分钟
3	苦味酸2~5g 蒸馏水100mL	试样在溶液中煮沸2~5min，以清楚显示磷化铁、渗碳体和碳化物及奥氏体晶界。球墨铸铁可适当延长
4	高锰酸钾0.1~1.0g 蒸馏水100mL	显示可锻铸铁的枝晶组织
5	高锰酸钾1~4g 苛性钠1~4g 蒸馏水100mL	浸蚀3~5min，显示磷化铁，碳化物随浸蚀时间的增加，可呈不同颜色
6	热染色（热氧腐蚀）	此法对铸铁非常有效。染色时珠光体先变色，铁素体次之，渗碳体不易变色，磷化铁更不易变色
7	氯化亚铁200mL 氯化镁4g 盐酸2mL 无水乙醇100mL	各种耐蚀、不锈钢及高合金铸铁试样的浸蚀
8	氯化铜1g 氯化亚铁1.5g 硝酸2mL 无水乙醇100mL	显示铸铁共晶团界面，浸蚀速度缓慢，效果好
9	硫酸铜4g 盐酸20mL 蒸馏水20mL	显示铸铁共晶团界面，浸蚀速度较快
10	氢氟酸5mL 水95mL	显示铝合金显微组织。轻度浸蚀

(续)

序号	组成	用途及使用说明
11	氢氟酸1mL 盐酸1.5mL 硝酸2.5mL 水95mL	显示铝合金显微组织。一般在常温下浸蚀15s左右,然后用15%硝酸水溶液除去黑膜。可较好地显示硬铝型铝合金
12	三氯化铁5g 盐酸10mL 水100mL	显示两相黄铜,β相呈暗黑色,α为明亮色枝干部分
13	饱和氢氧化铵氯化铜溶液	使两相黄铜中β相呈明亮色,α为暗黑色
14	硝酸铁5g 盐酸25mL 水75mL	适于显示纯铜晶界,对磨痕显露的敏感性小,故对单相、两相铜合金均有较好的浸蚀作用

把各种浸蚀剂所包含的化学药品和溶剂归纳起来有:酸、碱、盐以及酒精、水等。

酸是浸蚀剂中普遍应用的药品。盐酸、氢氟酸和硫酸是强氧化剂。在化学元素电位系列顺序中,氢以前的金属如Fe、Al等,溶解在这些酸中,伴随有氢气形成。另外的酸,如硝酸、苦味酸和铬酸在浸蚀时是弱氧化剂。碳钢和低合金钢微观浸蚀时,常常用这些酸的溶液作浸蚀剂,此时铁素体溶解而碳化物保留不受浸蚀。当用盐酸或硫酸时,碳化物也溶解。铁素体在硝酸酒精溶液中的溶解速度受晶体位向程度的控制,而在苦味酸溶液中,这种影响就很小。所以在硝酸酒精溶液中浸蚀,晶粒与晶粒间明显地显示出平坦和粗糙的差别。在苦味酸酒精溶液中浸蚀,铁素体各晶粒浸蚀程度基本一样,不显示平坦与粗糙的差别。利用这些不同的作用,就可以按不同要求,有效地显示组织。

铜是贵金属,是化学元素电位系列顺序中氢以后的元素,在酸溶液中不放出氢气,如果溶液中没有强氧化剂存在,则不溶于盐酸和稀硫酸中。空气中的氧能够起氧化剂的功用,但是浸蚀进行得很慢。所以在铜及其合金的浸蚀剂中,需加入氧化能力强的氧化剂,如过氧化氢或过硫酸铵。实际上,就过硫酸铵来说,不加酸也可以显示铜及其合金的组织。

正常浸蚀时,水溶液浸蚀速度远比酒精溶液快,这是由于浸蚀剂在水中分解强烈。利用这一特点,可以在短时间得到宏观的深浸蚀。若用于微观浸蚀,浸蚀速度快,进行浸蚀操作时必须掌握这一特点,注意控制。有些金属和合金用酒精溶液浸蚀,时间太长,如铜及铜合金。类似这种情况,用水溶液浸蚀就更合适了。铜及其单相合金,要清晰地显示晶界,而晶粒内部又不出现蚀点,是比较困难的。近年来有人推荐用硝酸铁和盐酸的水溶液 $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3(5\text{g})+\text{HCl}(25\text{mL})+\text{H}_2\text{O}(75\text{mL})]$ 浸蚀,可以得到满意的效果。

3. 化学浸蚀操作

用化学浸蚀来显示组织是广泛应用的古老方法。把抛光好的试样表面彻底清洗干净后,最好立即用浸蚀剂浸蚀,浸蚀的操作方法有两种:一是浸入法,把抛光面向下浸入盛有浸蚀剂溶液的玻璃皿中,不断摆动,但不得擦伤表面,达到一定的时间后,取出立即用流水冲洗,再用酒精漂洗,然后用凉风吹干,这样就可在显微镜下观察;二是擦拭浸蚀法,用不锈钢或竹制钳夹持沾足浸蚀液的脱脂棉拭蚀抛光面,待一定时间后停止擦拭,然后按上述操作顺序进行。很软的或浸蚀时间较长的金属材料,推荐用浸入法,对于浸蚀时

抛光面上易形成膜或固体沉积物的金属材料或浸蚀时间短暂的金属材料，推荐用擦拭法。

浸蚀的时间范围从几秒到几小时，当没有给出明确的时间时，浸蚀的合适时间是以试样抛光面颜色的变化来判断，浸蚀时光亮的表面失去光泽变成银灰色或灰黑色就可以了。浸蚀时间与温度密切相关，温度升高，时间缩短。为了便于控制，得到良好的衬度，许多金属材料的浸蚀是在室温下进行的。

金相试样抛光后，最好立即进行浸蚀，否则将因抛光面上形成氧化薄膜而改变浸蚀的条件。浸蚀后应快速用水冲洗，中止继续浸蚀作用，紧接着以最快的速度用酒精漂洗和凉风吹干，使水在试样表面的停留时间最短，否则试样表面会有水迹残留，有时会错误地认为是附加相，影响正确的检验。为了保证得到好的清洁表面，以便观察和照相，用酒精漂洗后，可在下列三种不同的溶液中连续漂洗：①丙酮（50mL）+甲醇（50mL）+柠檬酸（0.5g）的溶液；②丙酮（50mL）+甲醇（50mL）溶液；③化学纯的苯液体。经这样清洗干燥后，浸蚀表面清洁，组织清晰，效果最佳。

当试样浸蚀不足，浸蚀得太浅时，最好重新抛光后再浸蚀。如果不经抛光重复浸蚀，往往在晶界形成“台阶”，在高倍显微镜下，能够观察到伪组织；当试样浸蚀时间过长，浸蚀得太深时，必须抛光再浸蚀，必要时还要回到细砂布上磨光。

1.2.1.2 电解浸蚀

前面所讲的是无外电源作用的化学浸蚀，而电解浸蚀则是将抛光试样浸入合适的化学试剂的溶液（电解浸蚀剂）中，通较小的直流电进行浸蚀。

电解浸蚀的原理和电解抛光一样，只是电解浸蚀的操作规范选择在电解抛光特性曲线（图1-3）的AB段。工作电压一般为2~6V，工作电流与试样厚度有关，约0.05~0.3A/cm。

电解浸蚀主要用于化学稳定性较高的合金，如不锈钢、耐热钢、镍基合金等。这些合金用化学浸蚀很难得到清晰的组织；用电解浸蚀效果好，设备也不复杂。只要用简易的电解抛光设备，按有关手册所给试剂和操作规范进行即可，或者在电解抛光后，随即降低电压也可以进行电解浸蚀。

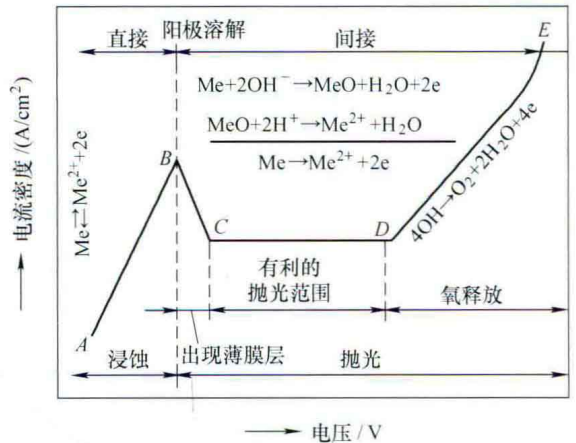


图1-3 电解抛光特性曲线

1.2.2 特殊显示组织的方法

本节主要介绍近年来应用较多的几种特殊显示组织的方法，如阴极真空浸蚀、恒电位浸蚀和薄膜干涉显示组织等。

1.2.2.1 阴极真空浸蚀

阴极真空浸蚀，开始于20世纪30年代，用一般浸蚀方法难以显示组织的情况下，用此法能得到好的效果。目前广泛用来显示各种材料的显微组织，如金属、金属陶瓷、陶瓷和半导体等。在辉光放电的环境中，用正离子轰击试样表面，使试样表面上的原子有选择

地去掉，从而显露组织。阴极真空浸蚀设备如图1-4所示。阴极真空浸蚀试样时，将已抛光好的试样去掉任何的夹具，放在用水冷却的铝支架上和铝制阳极一起密封在真空室内。随后用机械泵抽真空至真空度小于 $1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ，然后充以惰性气体氩，用调压阀控制其压力，使气压保持在 1.33Pa ，接通高压电源，增加到给定电压，经过短的诱发期而产生辉光，浸蚀即开始。浸蚀的时间因材料而异，从几秒钟到几分钟。达到规定时间后，立即断开电源，关闭控制阀，打开真空室，取出试样，进行显微观察。

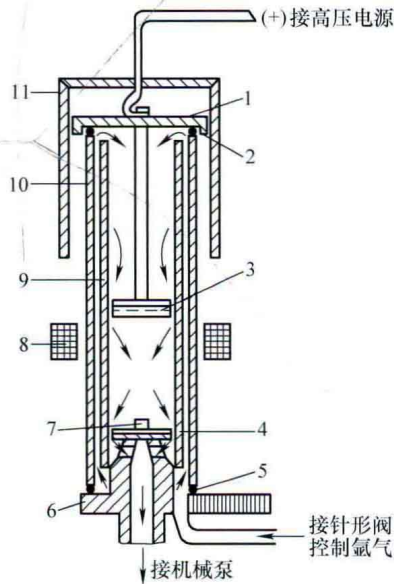


图1-4 阴极真空浸蚀设备简图

1—黄铜盖板 2、5—密封圈 3—铝阳极 4—铝阴极 6—接铜底板 7—试样 8—磁场线圈
9—衬管 10—套管 11—蔽罩

根据阿姆斯特朗 (Armstrong) 等的研究结果，把几种金属材料的阴极真空浸蚀的参数列于表1-5中，以便参考。

表1-5 几种金属材料阴极真空浸蚀法试验参数

材料种类	惰性气体压力/Pa	电压/kV	电流密度/(A/cm ²)	辉光诱发期/min	浸蚀时间/min	磁场强度/Oe (奥斯特)
铁	30	4~4.5	0.5~0.65	3	2	100
钢	30	4~5	0.5~0.65	3	2	
低碳钢	30	4~4.5	0.5~0.65	3	—	
镍	30	4~4.5	0.5~0.75	3	5	
铜及铜合金	30	4~4.5	0.5~0.65	3	3~4	100
铝及铝合金	30	3~4	0.5~0.65	3	3	100

影响浸蚀结果的主要因素是气压、电压、时间以及保持阴极试样的温度。

1.2.2.2 恒电位浸蚀

恒电位浸蚀是电解浸蚀法的进一步发展。一般电解浸蚀时，试样的阳极电位是发生变化的，难以掌握显示组织的过程。恒电位显示组织，采用恒电位仪，保证浸蚀过程阳极电