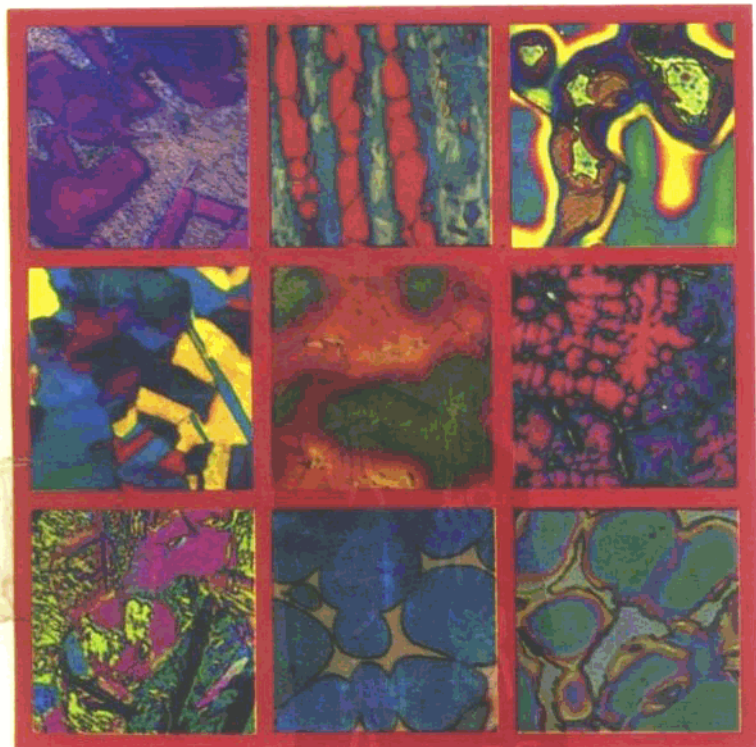


彩色金相技术

[应用图册]

CAISE JINXIANG JISHU

《彩色金相技术》编写组



彩色金相技术

(应用图册)

《彩色金相技术》编写组



国防工业出版社

(京)新登字 106 号

11025/11
内 容 简 介

本书为《彩色金相技术》一书的下册(应用图册)部分。全书以图册的形式介绍了彩色金相在各类材料中的具体应用及优越性,图片涉及钢铁材料、非铁材料、复合材料及各种处理状态及组织类型。全书内容丰富,图文并茂,每幅图片均附有制作方法及组织分析。由于彩色金相可显著提高金相组织的鉴别能力,故与上册联合使用具有较大的实用性。

本书是金相工作者、材料科研及生产检验技术人员的工具书,也可作为有关院校的数学参考书。



国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)
(邮政编码 100044)

新华书店经售
新时代出版社印刷厂印刷

850×1168 32 开本 9.875 印张 256 千字

1991 年 11 月第一版 1991 年 11 月第一次印刷 印数:0 001-3 000 册

ISBN 7-118-00438-3/TG·39 定价:11.10 元

前 言

在“彩色金相技术(原理和方法)”卷中,已将彩色金相的一些基本原理和各种操作方法做了必要的论述。对从事彩色金相工作的读者来讲,原理和方法无疑是十分重要的,而彩色金相对各种材料的具体应用的一些经验和技巧也十分关键。本书以上卷中所介绍的原理与方法为基础,以应用图册的形式,详细介绍彩色金相技术对各种材料的具体应用。

目前,这样的“应用图册”在国内尚无专著出版,国外出版者也为数不多。就我们所知,当前主要有两种已与读者见面:其一为 E. BERAHA 与 B. SHPIGLER 合著的“Color Metallography”(国内已有翻译本);其二为 H. Bühler 与 H. P. Hougardy 合著的“Atlas of Interference Layer Metallography”。这两本书都是彩色金相的权威著作,都是很有指导意义和参考价值的巨著,其作者都是彩色金相的奠基人和开拓者。前者对合金组织的显示和分析主要采用化学蚀刻沉积法,而后者则完全采用真空镀膜及离子溅射等物理方法。

北京理工大学(原北京工业学院)、华东工学院和五二研究所三个单位,几年来在科学研究中用彩色金相技术作为重要手段对各类材料的组织分析进行了大量的工作,积累了相当数量的金相组织彩色照片。在此基础上,经过我们认真地审查、评定,精选出 300 余幅,汇总成这本“彩色金相应用图册”。对金相组织的染色既采用了化学蚀刻沉积法、恒电位蚀刻沉积法、热染法等化学方法,也采用了真空镀膜法、离子溅射法等物理方法,以及某些光学方法。为了获得理想的彩色衬度,对某些材料还采用了化学法与物理法或光学法相匹配的彩色显示方法。这些彩色金相组织来自各种类型的材料,其中包括碳钢、合金钢、铸铁、工具材料、特殊钢、铝合金、铜合金、钛合金、镍基合金等,还涉及到某些陶瓷材料及复合材

料。

这本应用图册不同于一般的金相图谱,它的目的主要不是向读者介绍各种材料的典型金相组织,而更重要地有以下两个目的:其一是向读者提供尽可能多的、实践中行之有效的、对各种材料组织进行彩色显示的操作方法和参考数据,以便金相工作者参照这些内容,也可能做出高水平的彩色金相照片;其二是通过大量的图例,使读者深刻地理解彩色金相对分析各类材料中复杂组织的巨大威力和实用价值,大力促进彩色金相技术能够在工业生产及材料研究中发挥更大的作用。

在编写这本彩色金相应用图册的过程中,我们特别注意充分突出彩色金相的优越性,把分析重点放到那些用传统的金相方法(黑白显示)难以显示清楚,或难以区分和鉴别的复杂金相组织上,如复杂的表面渗层组织、各类马氏体的形貌及精细结构、合金中的各类偏析分布、晶粒的位向差别、工具材料中各类碳化物的区分、金属陶瓷涂层组织的分析,复合材料的组织显示等。为了把问题分析得更清楚,我们还采取利用一组彩色照片来说明某种金相组织的连续变化,例如激光表面处理组织的连续变化,随着加热温度的升高,组织的变化状况,炮管不同程度烧蚀层的一系列表现等。

为了方便读者,同时考虑到排版的需要,内容的编排分成三个部分:(1)彩色金相技术的典型应用评述;(2)图例,即彩色金相组织照片的汇集;(3)各个图例的具体说明。在文字叙述上,力求简单明了地把问题分析清楚。有些组织的分析中还列出了必要的电子探针分析数据,有的则列出了显微硬度测试结果。在介绍各类材料的显示条件时,还力求对显示技巧和可取的经验加以介绍。

众所周知,制备一幅彩色衬度十分满意的彩色金相照片是十分困难的:样品表面要求既无变形层又无磨痕,所选取的组织要典型,显示条件应能获得鲜艳的彩色衬度,拍摄照片时色温要校准,曝光量要合适,冲洗条件要控制精确,放大正片时要达到颜色平衡等。其中任何一步处理欠佳,都会影响全局,我们在进行这些工作时,虽然注意了上述各个环节,但仍然存在着很多不满意之处,有

待今后进一步完善和补充。

参加本书编写和提供彩色金相照片的同志有：

北京理工大学：伊秀珍、封文瑜、钟家湘、吴培英。

华东工学院：张永秀、李友荣、周柏森。

五二研究所：吴喜春、周英勤。

本书中还特别收集了一部分由中国科学院金属研究所郭蕴宜、李依依二同志提供的彩色金相照片(马氏体形貌、变形马氏体、镍基合金、复合材料等)，她们高超的技术为本书增添了光彩。

本书文字部分由钟家湘、吴培英执笔整理。

国家机械委兵器发展司张盛英工程师组织了全书的编写，并主持审稿工作。

北京理工大学石霖教授为本书写了“序”，在此深表谢意。

在制作某些彩色金相图片时，不少同志热情地向我们提供了材料或试样，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，水平有限，不妥或错误之处实属难免，希望广大读者给予批评和指正。

编著者

1988年3月于北京

序 言

光学金相显微技术的应用已经有一百多年的历史，它在揭示金属材料组织的形貌、组织的形成过程，以及显微组织与宏观性能间的关系方面做出过重要的贡献，对材料的发展与应用起过很大的推动作用。光学金相有着设备价廉、制片过程简便、操作易于掌握、视野范围宽的优点，它能使分析者在较大范围内掌握材料中组织的变化情况，从而对材料的整体状况做出较正确的判断。但光学金相技术的鉴别力差，使得它在分析材料微观结构及微区成分与组织的变化方面显得无能为力。电子光学显微分析技术的迅速发展为解开材料组织中微观结构的奥秘发挥着越来越大的作用。它在推动材料科学的进一步发展和阐明材料中的组织转变机制、相的结晶构造、晶体缺陷的形态、分布和作用方面等正显示着巨大的威力。但并不能由此而认为普通的光学金相技术已经过时，已经不再具有活力。这种观点是不正确的，也是不全面的。光学金相技术由于有着上面谈到的优势，它在材料的研制及生产中将仍然是科技工作者最乐于采用的一种组织检验方法。在材料的研制工作中，它仍然被认为是提供微观组织初级信息的重要手段。这些信息对于尔后的电子光学显微技术的选用是极其珍贵和有用的。近二十年来，光学金相在组织的显示技术方面取得了很大的进展，开拓了彩色金相技术。它一经出现便改变了黑白金相技术在鉴别不同显微组织方面、在区分不同相的性质方面、在显示组织中成分不均及晶体取向等方面所存在的软弱无力的状态，使之发生了极大的变化与改进。通过采用镀膜、化染、热染、恒电位蚀刻等各种显示技术，在试样表面形成一层在结构与成分上同基体组织状态密切相关的薄膜。这种膜可以是均厚的，也可以是非均厚的。不论何种情况，它们都通过光的干涉效应使材料中不同

的组织结构、不同应力状态、不同成分区域以及不同晶体缺陷密度区域呈现出不同的色彩。通过这种色彩的差异，可以比黑白衬度更清楚更准确地揭示出材料的组织状况及其间存在的微小差异。这样便从根本上改变了黑白光学金相分辨组织能力差的这一弱点。

当然，彩色金相技术尽管能通过丰富的色彩差别区分组织中各种不同相或不同成分区域，但却不能测定相的结晶构造或成分偏析区中具体元素的含量及分布。这就要借助电子显微分析技术，通过电子衍射及电子或离子探针分析来解决。但通过彩色显示所提供的信息却能使电子衍射及探针分析能更有目的、更有针对性地进行。这不仅提高了分析的效率，而且也可以根据彩色显示结果来进一步判断电子显微分析的结论是否真实和可信。而且，一旦借助电子显微技术将所确定的金属相的类型、晶体的取向程度和成分分布的特点同彩色金相显示的结果相对应，并找到其间的联系与规律后，就将赋予彩色金相以鉴别材料组织及相的能力。这对于光学金相应用范围的扩大和辨别本领的提高，无疑是一次很大的跃进。所以，彩色金相技术的发展不仅拓宽了光学金相的应用领域，而且还为电子显微分析技术提供了可靠的分析依据，密切了二者之间的关系。因之，光学金相与电子显微分析技术之间的关系是互相补充互相借鉴的关系，决不是后者取代前者的关系。

彩色金相技术的发展也为定量金相学奠定了良好的基础。材料的宏观性能与其微观组织结构之间的依赖关系已经随着材料科学的发展由定性评估过渡到定量分析的阶段。目前在工厂中广泛使用的等级标准（如晶粒度标准、碳化物标准等）只能作为定性判断材料组织合格与否的参考和初级判据，而不能由其确定材料性能与组织间的定量关系。彩色金相由于能对相的类型、形貌、尺寸及分布提供较准确较丰富的信息，从而使定量金相在建立组织与性能的定量关系中发挥出更大的作用。这对于材料科学的发展具有深远的意义。

这本《彩色金相技术（应用图册）》汇集了北京理工大学、

华东工学院、五二研究所和中国科学院金属研究所等若干单位多年来在彩色金相技术方面的研究成果。材料涉及的范围很宽，从黑色金属、有色金属直至陶瓷涂层材料、复合材料。材料处理时采用的工艺方法也多种多样，由铸、锻、焊、一般热处理、化学热处理到激光表面处理及等离子喷涂等。由此看出，彩色金相技术的适应性是非常广泛的，分析的潜力是很大的。在色彩鲜艳的图片中可以清楚地阐明固溶体中及可变成分相中微小的成分差异，钢中不同类型的碳化物、晶体取向度的微小差别、铝合金中众多成分与形态各异的复杂金属相的形貌，如此等等。同黑白金相相比，彩色金相技术的优势表现得极为突出。在各种马氏体形态的彩色显示中，不仅马氏体的取向、形态，而且马氏体本身各部位因应力状态及晶体缺陷性质和密度的不同都显示出不同的色彩。可以说，彩色金相照片有机地集中了从组织形貌、晶体取向、成分差异、应力状态等多种信息于一身，使金相技术工作者能够辩证地对材料的微观组织状况做出全面的、合理的判断。

这本彩色金相图册是我国自己摄制编辑的第一本彩色金相图册。它的出版反映了我国彩色金相技术不仅臻于成熟，而且达到了一个新的水平。在彩色显示技术上，这本图册几乎运用了目前可用的所有方法，如化染、热染、真空镀膜、离子溅射镀膜、恒电位蚀刻等。在将彩色显示技术应用于多种材料的组织显示方面也是国外目前出版的少数彩色金相图谱所不及的。在图片的色彩丰富度及显示组织的细节方面毫不逊色于国外同类照片。

希望这本图册的出版能引起广大金相工作者的兴趣与关注，能使彩色金相技术在材料研制中、在生产实践中、在产品检验中都获得越来越广泛的应用与推广，使我国的材料检验水平，金相技术水平提高到一个新的高度。

石霖

1988. 3. 12于北京

目 录

一、彩色金相应用概述.....	1
1. 彩色金相的特点和优越性.....	1
1·1 彩色金相中颜色衬度的获得.....	1
1·2 颜色衬度的控制.....	6
1·3 颜色衬度与显微结构的内在联系和 彩色金相图象的科学分析.....	12
1·4 彩色金相的优越性.....	16
2. 彩色金相在各种领域中的应用评述.....	18
2·1 钢铁材料显微组织的彩色显示和鉴别.....	18
2·2 非铁合金中相的鉴别.....	23
2·3 成分偏析的彩色显示.....	20
2·4 表层组织的彩色显示.....	34
2·5 焊缝、双金属及涂层的彩色显示.....	40
2·6 夹杂物的彩色金相.....	41
2·7 用彩色金相方法显示晶体位向.....	46
2·8 在定量金相中的应用.....	51
2·9 烧蚀层与高速形变区的彩色显示.....	56
2·10 回顾与展望.....	59
二、彩色金相应用图例.....	63
1. 碳 钢 (图 1—1 ~ 图 1—14).....	64
2. 普通合金钢 (图 2—1 ~ 图 2—15).....	71
3. 工具钢 (图 3—1 ~ 图 3—16).....	80
4. 高锰钢 (图 4—1 ~ 图 4—12).....	90
5. 不锈钢及耐热合金 (图 5—1 ~ 图 5—12).....	97

6. 马氏体 (图 6—1 ~ 图 6—28)	104
7. 铸 铁 (图 7—1 ~ 图 7—26)	129
8. 铝合金 (图 8—1 ~ 图 8—26)	144
9. 铜合金 (图 9—1 ~ 图 9—12)	157
10. 钛合金 (图10—1 ~ 图10—8)	163
11. 镍基合金 (图11—1 ~ 图11—9)	167
12. 其它合金 (图12—1 ~ 图12—18)	174
13. 双金属 (图13—1 ~ 13—6)	183
14. 复合材料 (图14—1 ~ 图14—6)	187
15. 焊缝组织 (图15—1 ~ 图15—13)	193
16. 陶瓷涂层 (图16—1 ~ 图16—7)	202
17. 渗层组织 (图17—1 ~ 图17—14)	206
18. 激光处理 (图18—1 ~ 图18—12)	214
19. 偏 析 (图19—1 ~ 图19—16)	221
20. 晶粒位向 (图20—1 ~ 图20—12)	229
21. 夹杂物 (图21—1 ~ 图21—12)	235
22. 烧蚀层 (图22—1 ~ 图22—8)	241
23. 高速形变组织 (图23—1 ~ 图23—6)	245
三、图例说明	249
〔附〕化染试剂编号成分一览表	303

一、彩色金相应用概述

近十几年来，彩色金相技术已有很大的发展，但是其推广应用的步伐还不是很快，其中一个很重要的原因是：许多人对于彩色金相究竟有什么优越性，它能解决哪些黑白金相解决不了的问题等一系列问题认识不清，有关文献中也缺少系统而明确的论述。因此有些人对彩色金相的应用价值产生怀疑。对于彩色金相工作者来说，这是一个不容回避的问题，几年来，我们一直在探索这些问题，寻求答案。

我们认为，彩色金相的正确应用，首先需有正确的理论指导，也就是说，首先必须认清：彩色金相的颜色衬度是如何获得的？颜色衬度受哪些因素的影响？颜色衬度和材料的显微组织结构又有何内在的联系等等。毫无疑问，只有先掌握科学的钥匙，才能打开彩色金相应用的大门。其次，彩色金相的应用又是一个实践的问题，因此需要通过大量的工作去验证彩色金相的可靠性和优越性，这样才有说服力。关于彩色金相的理论，在“彩色金相技术（原理及方法）”一卷中已作了详尽的论述，在本书中仅从应用的角度再做简要的分析，重点是通过大量的实例来论述彩色金相的优越性和应用价值。

1. 彩色金相的特点和优越性

1·1 彩色金相中颜色衬度的获得

人们已经熟知，传统的光学金相方法，是通过化学试剂的蚀刻作用，使金属表面产生凹凸不平，从而产生反光能力的差别，即通过所谓“黑白衬度”来显示微观组织的形貌特征。彩色金相则在显示方法上进行了重大的革新，它利用化学的或物理的方法，在试样表面产生一层具有特殊性质的薄膜，然后，利用光的薄膜

干涉效应，使金属及合金的显微组织呈现出不同的颜色，从而通过所谓“颜色衬度”去识别显微组织结构。颜色衬度是彩色金相理论和技术中的核心问题。黑白衬度只表明不同物体反光能力的差别，即灰度差，是单变量的衬度；颜色衬度除了亮度差之外，还包含着色调和颜色饱和度的差别，所以是三变量的衬度，显然，通过颜色衬度，对不同的物体具有更高的鉴别率。彩色金相正是充分挖掘了人的颜色视觉的潜在功能，把传统的光学金相推向了一个新的高度。

一般的金属及合金，本来是不具有颜色的，因为金属对可见光的反射能力极强，而且不具显著的选择性吸收，但是如果在金属表面复盖一层具有一定性质的透明薄膜之后，情况就发生了变化，反射光被分成两个部分：一部分是从空气与薄膜的界面上直接反射回来的，另一部分则是透入薄膜然后从薄膜与金属的界面上反射回来的，这两束光在薄膜表面相遇时，其传播方向相同，波长相同，但位相由于走过了不同的路程而产生变化，因此这两束光将发生干涉，当两束光的位相差为半波长的奇数倍并且两束光的振幅的绝对值相等时，二者将发生完全相消干涉。前者称为相消干涉的位相条件，后者称为振幅条件。由几何光学可以导出，波长为 λ 的单色光垂直入射到复有薄膜的金属表面，其反射光满足相消干涉的位相条件时：

$$\lambda_{\min} = \frac{2n_1d}{m + \delta_r/2\pi} \quad (1)$$

$$(m = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

其中：

$$\delta_r = \arctan \left(\frac{2n_1K_m}{n_1^2 - n_m^2 - K_m} \right) \quad (2)$$

上二式中：

λ_{\min} ——符合相消干涉位向条件的光的波长；

δ_r ——光从金属表面反射时的位相跃变

- d_s —— 薄膜厚度；
 n_s —— 薄膜的折射率；
 n_m —— 金属的折射率；
 K_m —— 金属的吸光系数。

此外，由相消干涉的振幅条件还可以导出，要满足完全消光的条件时，薄膜和金属的光学常数需符合如下关系式：

$$n_s = \sqrt{n_m + \frac{K_m^2}{n_m - 1}} \quad (3)$$

以上是薄膜干涉的三个最重要的关系式。

如果用一束由连续光谱组成的白光，投射到覆有薄膜的金属表面上，若其中某一波长的光正好符合相消干涉的位相条件和振幅条件，则该波长的光（用 λ_{min} 表示）被完全消除，那么反射光不再是白光，而出现与 λ_{min} 所对应的补色，这样原来无色的金属便得到了颜色，这种颜色叫干涉色。

干涉色的色调是由相消干涉的波长 λ_{min} 决定的，如果，金属中存在着不同的相，只要不同的相具有不同的光学性质，或者在不同相上形成了不同厚度或不同性质的薄膜，那么在不同相的表面产生相消干涉的波长将不同，因此不同的相可显示成不同的颜色，换言之，人们可以通过不同的颜色去识别不同的组织。

彩色金相中颜色衬度的获得可用图1(a)、(b)、(c)简示之。

由公式(1)和(2)可知，相消干涉的波长（ λ_{min} ）、或者说干涉色的色调，受薄膜厚度 d_s 、薄膜性质 n_s 以及金属本身光学常数 n_m 、 K_m 的控制。

首先， λ_{min} 与 d_s 成正比，因此对一定的金属、一定性质的薄膜而言，其干涉色随膜厚增加作周期性的变化，变化顺序为：黄、红、品、蓝、青（0级干涉带）、白（无色带）、黄、红、品、蓝、青（一级干涉带），膜厚继续增加，进入二级、三级干涉带（ $m = 2、3 \dots$ ）。但是，由于二级以上干涉带相互发生重叠，而且级数越高，重复越多，以致失去鲜艳的彩色，因此，为获得好的效

果，膜厚只能在一级干涉以下。一般，彩色金相试样表面形成的薄膜厚度大致在 1000Å 左右。

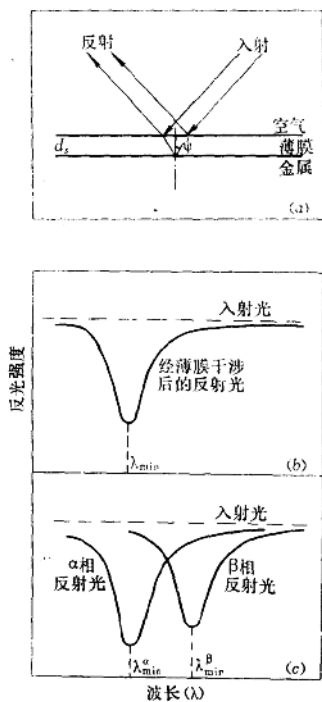


图1 彩色金相中颜色衬度获得的示意图

- (a) 薄膜干涉效应；
 (b) 白光照明，在 λ_{\min} 处产生相消干涉，产生干涉色；
 (c) 白光照明下，两相表面相消干涉波长不同，产生颜色衬度。

干涉色的色调也受到薄膜的折射率 n_s 的影响，在薄膜厚度一定的条件下，干涉色的色调也随 n_s 的增加而连续地规律地变化，已有文献指出，在许多情况下，厚度仅 1000 \AA 左右的干涉膜，其成分、结构却相当复杂，对于薄膜性质的研究，特别是微小区域中的研究，到目前为止还很困难，但已受到显著的重视。

金属本身的光学性质对干涉色的影响最引人注目，因为它把颜色衬度与金属本身直接联系起来，由公式(3)可知，光在具有不同光学性质的金属表面反射时，产生的位向跃变 δ 不同，进而改变了 λ_{\min} 的数值。近十年来，国外许多研究者致力于测定各种合金相的光学常数，积累了许多宝贵的数据，对于彩色金相的发展，起了重要的作用。

关于干涉色的饱和度的问题，我们在“彩色金相技术（原理及方法）”一卷中，做了基本的阐述，因为饱和度决定于色光中所包含的白光的多少，白光成分越多，颜色的饱和度越低，颜色越浅淡，因此，对干涉色而言，其饱和度主要受相消干涉振幅条件的影响，如果符合相消干涉的位相条件的两束光，其振幅的绝对值不等，那么两束光干涉后，只能部分削弱，因此反射光中包含了较多的白光成分，干涉色的饱和度不高，只有完全满足振幅条件， λ_{\min} 波长的光完全消除，干涉色才能获得最高的饱和度。由前述可知，这只有在薄膜的光学常数与金属的光学常数符合公式(3)的关系时，才能达到。对于一般的金属或合金相， n_m 值为 2 左右， K_m 为 3 左右，要满足振幅条件， n_s 值需大于 3，这是很困难的。因此，不是随便什么物质都可用于形成干涉膜的，首先应该是具有很高折射率的物质，否则是得不到鲜艳的干涉色的。

1·2 颜色衬度的控制

一般实际应用的金属材料，绝大多数是多相合金，具有比较复杂的组织状态，作为研究金属组织形貌的重要手段，必需把各种不同的相或组织精确地显示出来，区分开来。因此，对彩色金相来说，我们关心的不是单一的相形成什么颜色；而是说如何能够使各种相能形成不同的色彩，具有最鲜明的颜色衬度，或者说