

最新有色金属金相 图谱大全

◎ 主 编 高 强

冶金工业出版社

最新有色金属金相图谱大全

主编：高 强（有色金属研究院教授）

第四卷

中国冶金工业出版社

三、非金属夹杂物的鉴别

非金属夹杂物的鉴别往往需要多种方法（金相法、岩相法、化学分析法、电子显微镜等）综合分析，才能得到正确判断。金相法是最常用的方法之一，居重要地位。通常是在显微镜下利用明视场、暗视场、偏振光下的光学特性进行分析。在正交偏振光下各类夹杂物将有不同的反射规律：

(1) 各向同性不透明夹杂物反射光仍为线偏振光。正交偏振光下呈黑暗一片，转动载物台一周无明暗变化。如 FeO 夹杂即属此类。

(2) 各向异性不透明夹杂物在线偏振光照射下将发生振动面的旋转，使反射偏振光与检偏镜改变正交位置，部分光线可通过检偏镜。转动载物台一周观察到四次明亮，四次消光。如钢中的 FeS 夹杂可观察到这一现象。

(3) 各向同性透明夹杂物在正交偏振光下可观察到与暗视场相同的颜色（体色）。如 MnO ，具各向同性，正交偏振光下与暗场下观察到相同的颜色—绿色。

(4) 各向异性透明夹杂物在正交偏振光下可观察到包括体色和表色组成的色彩。如钛铁矿 ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$)，三角晶系，各向异性，暗场下薄层时透明，呈玫瑰色或褐色等。偏光下呈闪耀明亮的玫瑰红色。

(5) 透明球形夹杂物除可显示透明度及色彩外，还可看到黑十字效应及等色环。如球状玻璃质的 SiO_2 夹杂及铁硅酸盐 ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) 夹杂均可看到黑十字效应及等色环。图 3-14 为铁硅酸盐夹杂在明场和偏光下的光学特征。

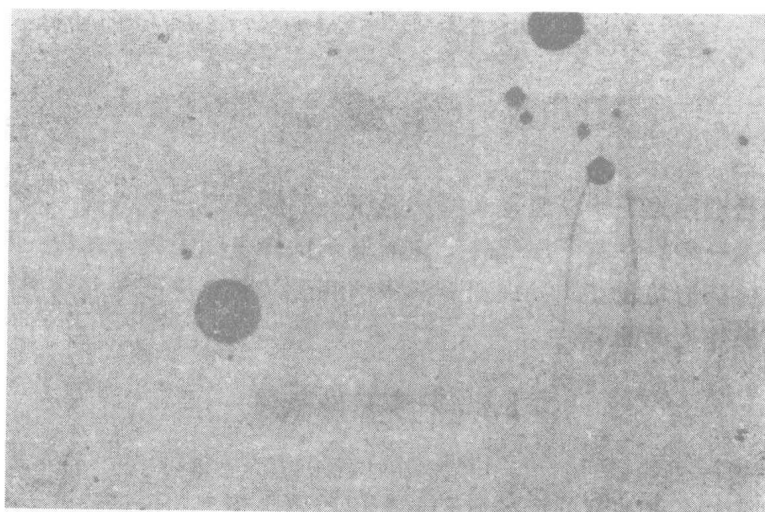
非金属夹杂物是冶金质量常规检验的重要内容，有关钢中夹杂物的金相鉴别方法将在第十二章中讨论。

四、范性变形、择优取向及晶粒位向的测定

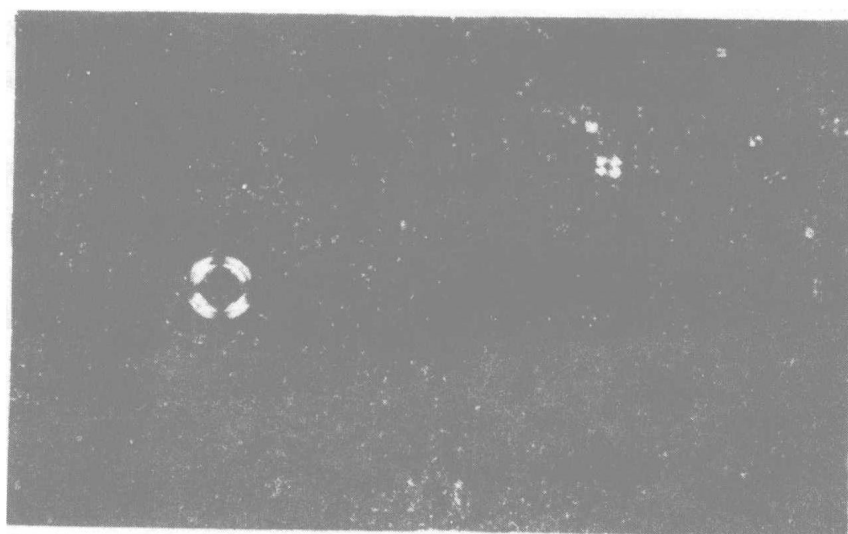
如果多晶体金属受外界条件的影响，晶粒以一定位向排列起来，例如范性变形后，或范性变形再结晶后晶粒的择优取向（即形变织构或再结晶织构），由于多晶体位向的一致排列，在同一金属磨面上将有一致的光轴位向，因此，正交偏振光下整个视域内明暗程度应趋于一致—近于单晶体的偏振效果。或整个视域明亮，或整个视域黑暗。

我们可以用光度计测量整个视域反射光的总强度，记录它随载物台转动时的变化。无择优取向的多晶体反射光的总强度不随载物台转动而变化；有择优取向的多晶体反射光强度将随载物台在转动一周中交替产生四次明亮四次黑暗的变化。明暗差别愈显著，表征择优取向程度愈高。

有人利用偏振光测定硅钢片经浸蚀后 $\{100\}$ 晶面的位向，以半定量地估计择优取



(a) 明场



(b) 偏光

图 3-14 钢中的铁硅酸盐夹杂

向的程度。

偏光显微镜在金相分析中的应用不限于此，但目前应用最为广范的还是金属材料内夹杂物的研究。

第四章 干涉显微镜

干涉显微镜是利用光的干涉原理来提高显微镜的垂直鉴别能力的一种特殊显微镜，现代万能金相显微镜一般均带有干涉部件。它能显示试样表面的微小起伏，故常用于观测表面浮凸部分的几何外形与尺寸。如表面光洁度的测量，形变滑移带和切变型相变浮凸的观测，以及裂纹扩展等方面的研究。

第一节 干涉理论概述

一、等厚干涉

为了说明干涉的一些基本问题，我们首先讨论劈尖干涉：取两块光学平面玻璃，如图 4-1， MQ 为反射平面镜， MN 为透射镜，使其一端互相叠合，另一端垫一薄纸便形成空气劈尖。两玻璃片交线 MM' 为棱边，在平行棱边的线上，劈尖的厚度相等。

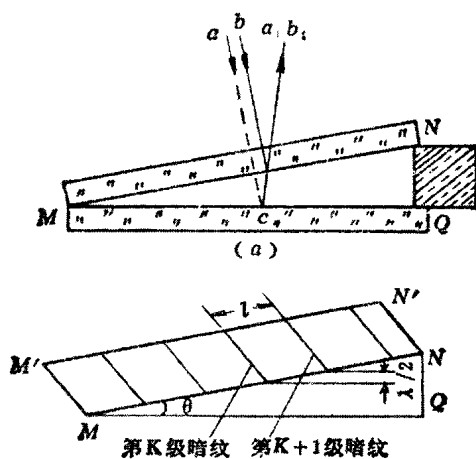


图 4-1 劈尖干涉

当平行单色光垂直入射于这样的两玻璃片时，在空气劈尖的上下两表面所引起的反

射光线将形成相干光。劈尖在 C 点处的厚度为 h ，在劈尖上下表面反射的两光线 a_1 ， b_1 之间的光程差是：

$$\Delta L = 2nh + \frac{\lambda}{2}$$

式中 n 为两平面玻璃间介质的折射率（对于空气介质 $n=1$ ）， $\frac{\lambda}{2}$ 是由于从空气劈尖的下表面反射的光有半波损失，所以在式中有附加的半波长光程差。由此，反射光的干涉条件为：

$$\Delta L = 2nh + \frac{\lambda}{2} = K\lambda \quad K=1, 2, 3, \dots \text{亮条纹}$$

$$\Delta L = 2nh + \frac{\lambda}{2} = \left(K + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad K=0, 1, 2, \dots \text{暗条纹}$$

每一亮，暗条纹都与一定的 K 值相当，即与一定的劈尖厚度 h 相对应，所以，这些干涉条纹称为等厚条纹。亦称斐索（Fisau）干涉条纹。

1. 干涉条纹的形状和间距

由光程差的表达式可见：凡薄膜厚度相同的地方，光程差相同，干涉强度也就相同。如果劈尖的上下两个表面都是光学平面，等厚条纹将是一系列与棱边 MM' 平行的、间距相等的，亮暗相间的条纹（见图 4-1（b））。每一条干涉条纹都对应着 MN 面上的同一高度。

设第 K 级与第 $K+1$ 级暗条纹相应的薄膜厚度为 h_1 ， h_2 ，则对应的光程差分别为：

$$\Delta L_1 = 2h_1 + \frac{\lambda}{2} = \left(K + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$\Delta L_2 = 2h_2 + \frac{\lambda}{2} = \left(K + 1 + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

两式相减得： $\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{\lambda}{2}$ 。即任意相邻的两暗条纹（或亮条纹）处薄膜厚度差为 $\frac{\lambda}{2}$ 。

若劈尖的倾角为 θ ，两相邻暗条纹间距为 l ，则有：

$$l = \frac{\lambda}{2\theta} \quad (\because \sin\theta \approx \theta)$$

可见：劈尖的倾角愈小，单色光波长愈长，则条纹间距愈大，反之则愈小。

若形成劈尖的平面玻璃 MQ 上存在凸起或凹陷的地方，则等厚干涉条纹将在凸凹处发生弯曲。干涉条纹弯曲的突出部分背离棱边时，表明 MQ 上有凸起；干涉条纹弯曲的突出部分迎向棱边时，表明 MQ 上有凹陷。犹如地图上的等高线一样。

以上分析是假定 MN 为平整光滑的标准面，如果反过来令 MQ 为标准面， MN 为高

低不平的表面，那么所得的干涉条纹应该是一样的。我们以图 4-2 来说明干涉条纹的形状与表面几何外形的关系。图 4-2 (a) 表示光滑表面上有一凸起（如表面浮凸），干涉条纹在凸起部分发生弯曲，并背离棱边；图 4-2 (b) 是一个具有台阶的平面（如滑移台阶），它的干涉条纹是阶梯形折线，台阶高出面背离棱边。

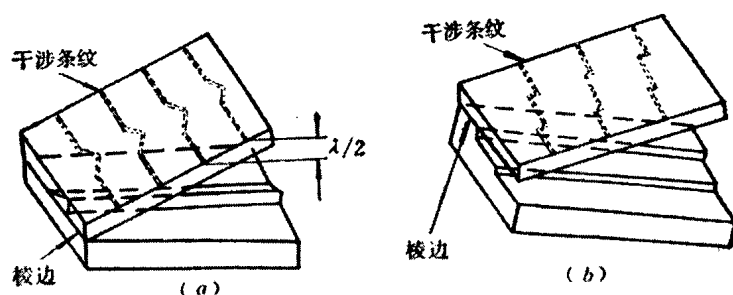


图 4-2 干涉条纹的形状与表面几何外形的关系

由于相邻两干涉条纹间距 l 表征一定的高度差 $\left(\Delta h = \frac{\lambda}{2}\right)$ ，因此，测量干涉条纹的弯曲量 a 与 l 的比值（如图 4-3），即可得知浮凸（或凹陷）及台阶的高度 H 。



图 4-3 干涉条纹的计算

$$H = \frac{a}{l} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

由此可见：光波干涉技术若与显微镜相结合，将能精确地测定金相磨面的几何外形。

2. 干涉条纹的移动

仅凭干涉条纹的弯曲不能确定某处高度差究竟是凸起还是凹陷所致。为此，可通过干涉条纹的移动来判明。一定的干涉条纹对应一定的光程差，若薄膜厚度变化时，光程差为其一特定值的点将怎样移动呢？见图 4-4，观察某一厚度 H_K 处对应的 P_K 点（此处为暗条纹），当 θ 减小时， P_K 点移到了 P'_K 点，即原来 K 级暗条纹移到了 P'_K 点。可见当薄膜厚度随 θ 角减小时，干涉条纹背离棱边移动，反之则迎向棱边移动。由此首

先确定了棱边位置，随即可判断干涉条纹的弯曲处是凸起还是凹陷。

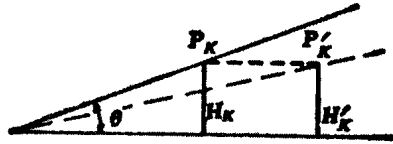


图 4-4 干涉条纹的移动

二、多光束干涉

以上讨论的薄膜干涉，只考虑上下表面两束反射光之间的干涉。实际上，反射光束不只两束，只有在薄膜反射率极小的情况下，高次反射才可以忽略不计。随着反射率的增加，参加干涉的光束越来越多，其效果是干涉条纹越来越细锐。

1. 相邻两相干光的光程差和位相差：

首先计算相邻两反射光 1、2 的光程差：见图 4-5，设薄膜厚度为 h ，折射率为 n ，空气折射率为 n' ，则

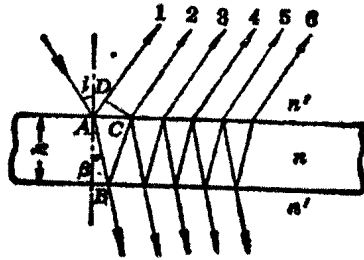


图 4-5 多光束干涉

$$\Delta L = n (\overline{AB} + \overline{BC}) - n' - \overline{AD}$$

利用折射定律 $n' \sin i = n \sin \beta$ 得

$$\Delta L = 2nh \cos \beta = 2h \sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i}$$

因为 $n' < n$ ，光束 1 反射时有半波损失，所以光程差

$$\Delta L = 2h \sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2}$$

位相差

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(2h \sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} \right)$$

其它相邻光束位相差并不受半波损失的影响，其位相差均为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2h \sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i}$$

2. 透射光和反射光干涉的强度公式

已知相邻两光线的位相差，可以写出相应的光矢量振动方程式，然后迭加，再根据光强正比于合成振幅的平方，经数学运算可得透射光干涉强度公式：

$$I_T = \frac{I_0}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}$$

式中 $I_0 = E_0^2$ 代表入射光光强， $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ ，其中 R 为反射率（反射系数或反光能力）， F 称为细度系数。

由能量守恒定律： $I_T + I_R = I_0$ ，式中 I_R 为反射光的干涉强度。

$$\therefore I_R = \frac{F \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}} \cdot I_0$$

这说明反射光强的地方，透射光弱；反射光弱的地方，透射光强，二者干涉花样是互补的。上式及图（4-6）曲线都表明 I_T 和 I_R 虽都与 R 有关，但极大值和极小值的位置仅由 δ 决定，与 R 无关。 I_T 极大值在 $\delta = 2K\pi$ 的地方，对应 I_R 的极小值；而 I_T 极小值在 $\delta = (2K+1)\pi$ 的地方，对应 I_R 的极大值。

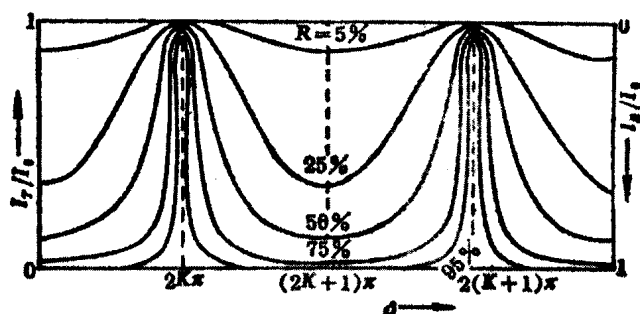


图 4-6 透射光干涉强度和反射光干涉强度与位相差的关系

3. 反射率 R 对强度分布的影响

由电磁场理论可以证明，在入射角较小时，透明介质反射率 $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$ ，例如：在普通玻璃（ $n_1 = 1.5$ ）和空气（ $n_2 = 1$ ）的界面上，大致 $R \approx 5\%$ ，可以近似地认为 $R \ll 1$ ，这时有 $(1-R)^2 \approx 1$ 即：

$$I_r = \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\delta}{2}} \approx \frac{I_0}{1 + 4R \sin^2 \frac{\delta}{2}} \approx \left(1 - 4R \sin^2 \frac{\delta}{2}\right) I_0$$

$$I_R = \left(4R \sin^2 \frac{\delta}{2}\right) I_0$$

这和等振幅双光束干涉强度随位相变化公式相类似，反衬度等于 1。与此同时透射光的干涉花样中有一很强的均匀背景（见图 4-6），所以透射光干涉花样的反衬度很小，实际上很少用。

对 R 较大的情况（喷镀一层金属膜），由图 4-6 曲线可见， R 越大，透射光强度的极大峰（或反射光强度的极小峰）的细锐程度愈高，实际上，当 $R \approx 1$ 时， $\sin^2 \frac{\delta}{2}$ 的系数 $F = \frac{4R}{(1-R)^2} \gg 1$ ，因此 I_r 对 δ 的变化很敏感，当 δ 稍偏离 $2K\pi$ ， I_r 便从极大值急剧下降， R 增大意味着参加干涉的光束数目愈来愈多，其结果使干涉条纹的锐度增大。多光束干涉显微镜是用反射相干光束， R 很大时，亮条纹虽然不细锐，但其暗条纹很细锐，同样可以使用，见图 4-7。

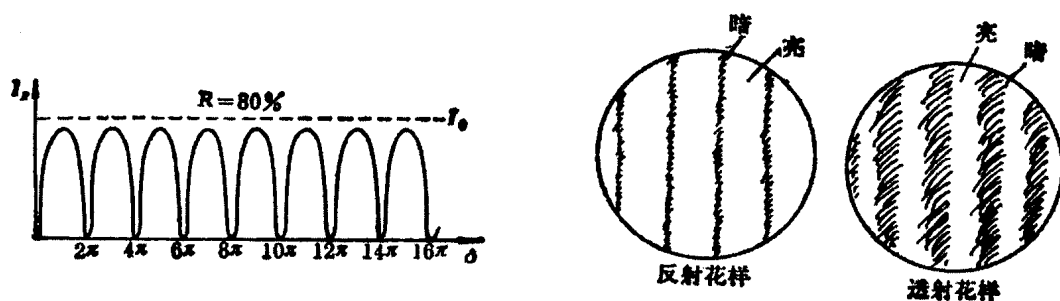


图 4-7 多光束干涉花样

第二节 干涉显微镜

干涉显微镜分为双光束和多光束两类，通常测定工件加工光洁度及高度差约为 $1/10$ 波长的显微组织可采用双光束干涉显微镜，林尼克干涉显微镜即属这一类。而多光束干涉显微镜能显示试样表面相邻两点为 $1/1000$ 波长的高度差，因此在金相组织的分析中有重要意义。

一、双光束干涉显微镜

双光束干涉显微镜的原理是将图 4-1 上的两个平面 (MN 和 MQ) 分开, 采取一定的方法使两支光束形成光程差, 相互干涉而形成斐索干涉条纹。林尼克首先设计成这类显微镜, 因此又称为林尼克干涉显微镜。

图 4-8 是林尼克干涉显微镜的示意图, 其中 P_1 、 P_2 是两个半立方体的光学校镜, 沿着镀有薄银层的对角面粘合起来。光源 S 发出的单色光在镀银半反射层被分为两束光; 一束光经物镜 O_1 在试样 M_1 上反射。反射光线再透过镀银层进入目镜; 另一束光经物镜 O_2 在标准平面 M_2 上反射, 反射光线再经镀银层反射后进入目镜。这两束光在镀银层相遇发生干涉, 因为 M_1M_2 并非绝对正交, 调节 M_2 , 使 M_2 在镀银层中形成虚像 M'_2 , 从目镜中看, 好像两束相干光是从形成空气劈尖的 $M_1M'_2$ 反射而来, 故产生等厚干涉条纹。显然, 调节 M_2 倾角可以改变干涉条纹的间距, 当试样表面有凸凹存在时, 斐索干涉条纹将在凸凹处发生弯曲。如图 4-9。

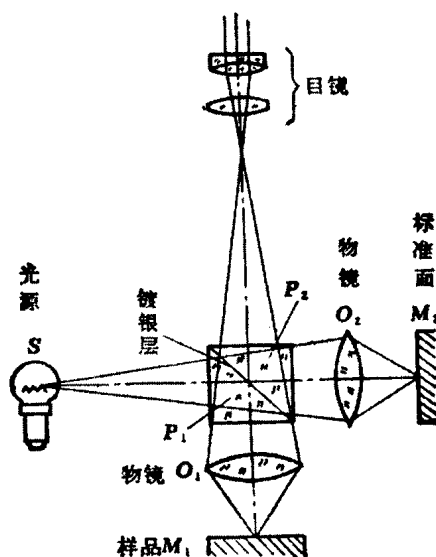


图 4-8 林尼克干涉显微镜的光程

林尼克干涉显微镜在精密测量中应用很普遍, 由于其结构小型简便, 各国生产型号很多。如德国 Zeiss 林尼克干涉显微镜; 苏联 $MuM-4$ 林尼克干涉显微镜; 日本奥林派斯显微干涉仪等。

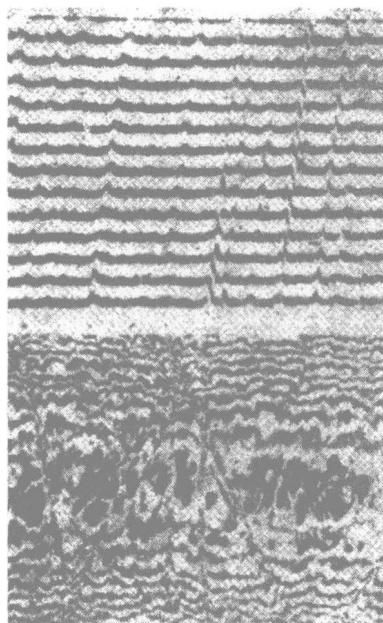


图 4-9 干涉图象

二、多光束干涉显微镜

为了得到细而清晰的干涉条纹，发展了多光束干涉显微镜。即使光线在两平行（或近乎平行）的平面间多次反射而产生多光束干涉。以显示磨面上更微小的高度差。

多光束干涉显微装置要求入射光为单色强平行光。且尽可能垂直入射试样表面；干涉平面必须非常均匀地喷镀一层金属薄膜，并且镀层应具有高反射系数及低吸收率；两反射面间的距离愈小愈好，最大不超过入射光波长的几倍。

一般金相显微镜仅需配用单色光，并在试样上装置标准平面玻璃就可以做多光束干涉的金相研究。多光束干涉显微镜的光程如图 4-10，它与一般金相显微镜的构造基本相同。标准平面玻璃靠样品的一面涂有半透明的银（或铝）的薄膜，又称为干涉试片，干涉试片可以是平面的，或不同曲率的。如 MeF 显微镜备有六个具有不同反射能力及不同曲率半径的试片，使用时要根据观察物的表面曲率及对光的吸收能力进行选择。见表 4-1：有强反射能力的试样（如金属），应选用涂银半透明的试片；当物体为凹入形状时，应选表面为凸起形状的试片，目的是使干涉试片与物体尽可能靠近。

多光束干涉也可设计满足多次反射的试样夹具，利用一般金相显微镜作干涉分析，图（4-11）是可供倒立式金相显微镜使用的试样夹具，试样 1 粘附在可调节圆盘上，2

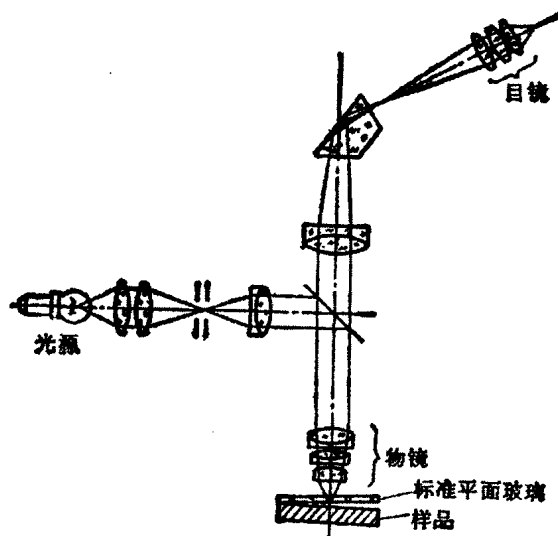


图 4-10 多光束干涉显微镜的光程

为光学平面玻璃，其面对试样的一面镀有金属薄膜，借螺丝可调试样与标准平面之间倾角，德国 Neophot II 型金相显微镜配备有类似的干涉试片，将试样置于上面，可造成干涉劈尖，产生多光束干涉条纹，仪器配有不同倾斜度的平面干涉板，圆球面干涉板以供选用。

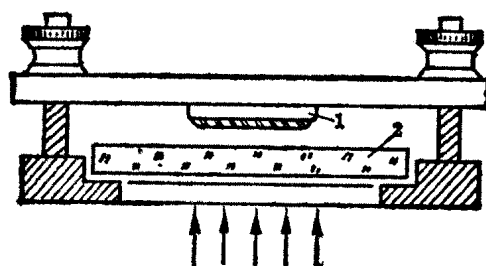


图 4-11 多光束干涉用试样夹具

图 4-12 为透、反射两用 CEJ - Multimi 多光束干涉显微镜光路图，可测量 $10 \sim 1000\mu$ 的高度差，移去干涉仪部分可作一般金相显微镜用。图中： Hg 为水银灯， $L_1 L_2 L_3$ 为透镜， $P_1 \sim P_6$ 为棱镜， K 为平行光透镜， F 为滤光器， S_p 为半透明半反射镜， Ob 为物镜， M 为被测样品， I 为干涉板（镀有金属薄膜，反射率极高的标准平面）， $(P_2 + P_3 + L_2)$ 是可回转构件， OK 为目镜， S_i 为测微目镜片。由水银灯发出的光经 K 变成平行光束，再经半反射镜 S_p 射到干涉板 I 与试样平面 M ，在 I 与 M 间多重

反射后投向物镜，则干涉条纹即可于目镜处被观察及测量。若将 P_2 、 P_3 转出光路，则光线直接射下来经 P_4 、 P_5 投射于试样产生干涉，此系透射式。

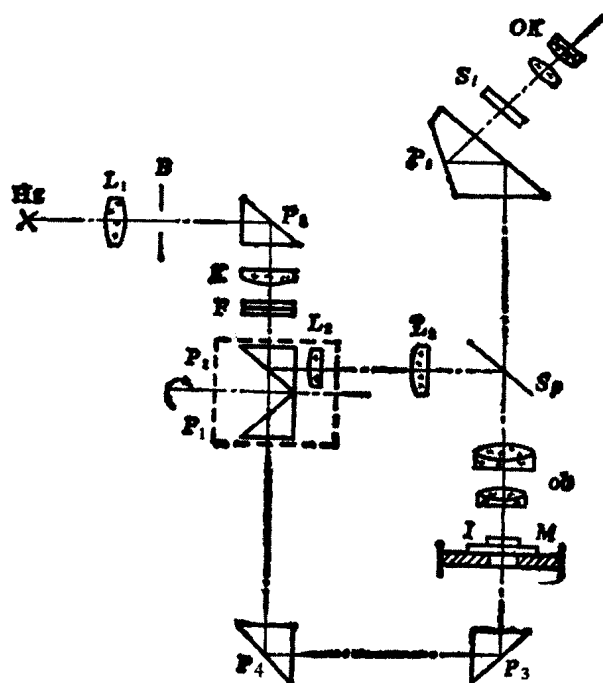


图 4-12 CEJ-Multimi 多光束干涉显微镜的光程

表 4-1 干涉试片的选用规范

试 样		试 片		试片夹持器上标志
材 料	表 面 形 状	反 射 器	表 面 形 状	
强反射能力 (金属)	(1) 凸形，有任意的曲率半径。	涂银半透明	平面，曲率半径 ∞ 。	∞ hr
	(2) 平面，或曲率半径大于 3mm 的凹形。		凸形，曲率半径为 3mm。	+ 3.0hr
	(3) 凹形，其曲率半径为 3.0~1.5mm。		凸形，曲率半径为 1.5mm。	+ 1.5hr

续表

试 样		试 片		试片夹持器上标志
材 料	表 面 形 状	反 射 器	表 面 形 状	
弱反射能力 (非金属)	(1) 凸形, 有任意的曲率半径。	未涂银	平面, 曲率半径 ∞ 。	∞
	(2) 平面, 或曲率半径大于3mm的凹形。		凸形, 曲率半径为3mm。	+3.0
	(3) 凹形, 其曲率半径为3.0~1.5mm。		凸形, 曲率半径为3mm。	+1.5

应当指出: 随着物镜放大倍数的增大, 物镜与试样之间无法容纳干涉薄片时, 有人采用“薄膜法”, 将稀释后的火棉胶或加拿大胶直接涂在试样表面上, 在它未干前使样品稍倾斜, 待干燥后, 即在试样磨面上形成极薄的火棉胶劈尖, 再真空喷镀一层金属反射层, 这样便形成干涉器。但由于物镜放大倍数的增高, 入射光线的平行度降低, 影响干涉条纹的锐度, 故干涉条纹不如原有的细锐。

第三节 干涉显微镜在金相分析中的应用

干涉显微镜在金相分析中的应用, 主要是观测金相磨面的微观几何外形与高度差。归纳如下。

1. 金属范性变形组织的研究 这一研究不仅可显示形变后的表面形貌, 而且能正确测定表面滑移带的高度。

2. 表面浮凸的观察 表面浮凸的观察能有效地鉴定相变组织(如马氏体、贝氏体、魏氏组织等)的表面浮凸形貌, 并且可测得其体积效应的数值。

3. 螺旋状(或其它形貌)成长的晶体的研究 这一研究能清晰观察其生长形貌, 精确求得生长台阶的高度。

4. 金属蠕变的研究 例如 Fe-30%Ni 合金的马氏体在浸蚀磨面上呈竹叶状, 它的表面浮凸在干涉显微镜下得到图 4-13 的干涉条纹外形, 在马氏体针处干涉条纹向同一方向弯曲, 说明此处中间高, 两边倾斜, 尤如鱼脊状外形。

图 4-14 是在相衬显微镜下观察到的碳化硅晶体的六角形螺旋生长表面几何外形, 图 4-15 是同一视域的多光束干涉条纹, 由此可以正确地测出螺旋台阶的高度差。

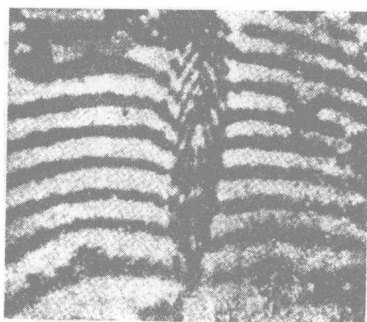


图 4-13 马氏体针浮凸 (Fe-30%Ni)

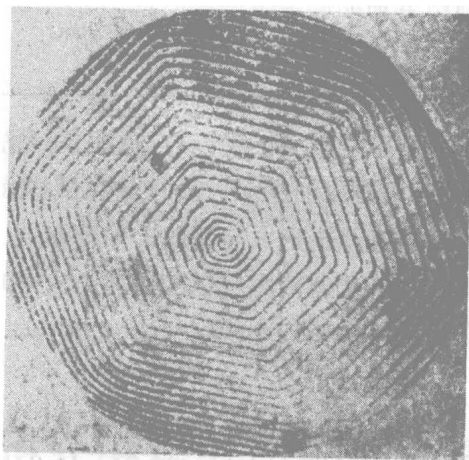


图 4-14 碳化硅晶体的六角形螺旋生长台阶外形, 每级高差为 $165\text{\AA}$
($90\times$ Verma)

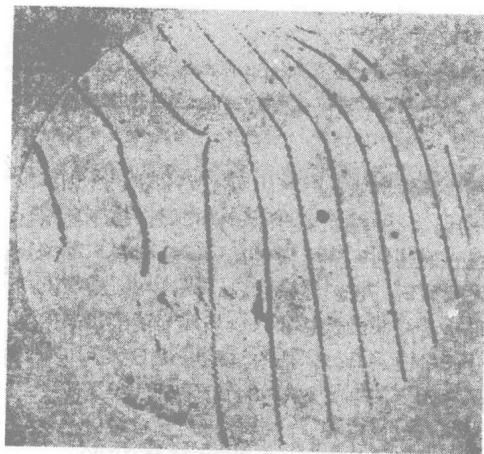


图 4-15 图 4-14 同一视域的多光束干涉条纹 ($45\times$ Verma)

第五章 相衬金相显微镜

一般金相显微镜是靠试样磨面反射光的强度差来鉴别金相组织的，其依据是（1）借两相组织的反射系数不同，反射系数较小的相，在显微镜下呈暗淡色调。（2）两相色彩的不同，包括相固有色彩的差别或薄膜染色显示后获得色彩的差别。（3）晶界（或相界）凹陷，使直射光发生散射，使晶界呈暗色。但是在有些情况下，不同组织的反射系数极为相近，导致衬度很小，用一般金相显微镜是很难鉴别出来的。因此必须设法提高衬度。目前在光学金相分析中提高组织衬度的途径有两方面：（1）改变样品表面状态。采用各种方法使不同组织形成一定厚度的薄膜，由于干涉而呈颜色衬度。（2）采用相衬，偏光干涉相衬装置，将具有微小位相差的光转化为具有较大强度差的光，以提高衬度，下面就讨论怎样实现这种转化。

第一节 相衬显微分析的基本原理 及其在金相分析中的应用

相衬显微镜是利用特殊相板的作用，使不同位相的反射光发生干涉或迭加，借以鉴别金相组织，故又常称为“相差显微镜”。试样表面高度差在十埃到几百埃范围均能清楚地被“相衬显微镜”所鉴别，近二十年来国外生产的大型金相显微镜大都备有相衬装置，以供鉴别某些组织时使用。

一、相衬方法的基本原理

众所周知，光是一种电磁波，而且是横波，即电场强度矢量 $\vec{E}$ 和磁场强度矢量 $\vec{H}$ 的振动方向与其传播方向 $\vec{C}$ 互相正交（见图 5-1），因为光对眼睛或感光仪器（照相底片）起作用的主要是电场强度 $\vec{E}$ 矢量，故 $\vec{E}$ 常称为光矢量。

1. 光矢量的表示法

振动在介质中的传播，简称为波动，激发波动的振动系统称为波源，机械振动在弹性媒质中的传播，称为机械波，变化的电磁场在空间的传播，称为电磁波，电磁波具有