

Mach-Zender 干涉显微术原理及其在矿物学中的应用¹⁾

周 汉 明

(中国地质大学数理系, 武汉 430074)

黄 思 骥

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

孟 宪 章

(中国地质大学数理系, 武汉 430074)

摘要 折射率不仅是岩矿鉴定方面重要的光学数据,而且在地质研究中也很有意义。本文介绍了 Mach-Zender 干涉显微术测量折射率的基本原理、方法和光学系统,笔者应用这种新方法测量透明矿物晶体的折射率(高折射率),所测得的数据与标准值很好地吻合。此外还给出它在矿物环带、出溶作用等方面的应用。

关键词 干涉条纹,显微术,折射率,环带

Mach-Zender 干涉仪是 L. Mach 和 L. Zender 于 19 世纪末各自独立研究出来的^[1]。最初,主要用来测量折射率接近于 1 的气体的折射率。它是一种大型仪器,两束干涉光之间的距离可达 1—2m,通常用来研究大体积介质的折射率分布,尤其适用于研究气体密度迅速变化的状态,用途很广。特别是在空气动力学中用它研究气体的折射率变化,很有价值。例如,航空工程中的风洞实验便是研究气流经过飞机模型时,模型周围压强的分布。因为气体折射率的变化与其密度或压强成正比,而折射率的变化将使通过气体光束的光程随之改变。所以,如果用一平面光波和一通过气体的光波发生干涉来获得等厚干涉条纹,则这些条纹的分布就反映了气体折射率和密度的空间分布。近年来,有些实验室应用 Mach-Zender 干涉仪来研究可控热核反应中等离子区的密度分布。Mach-Zender 干涉仪的另一种重要应用是测量光学零件或光学系统的像差。在全息术中用来研究多色全息术或制备全息滤波器等^[2]。

笔者应用 Mach-Zender 干涉仪与显微镜结合,并且使两束相干光的间距在 10cm 左右,发挥了干涉仪与显微镜两方面的功能,可以观察、测量透明固体样品微小区域内折射率的空间分布,特别是测量某些高折射率矿物晶体的折射率,是传统的“油浸法”难以完成的,还可以从矿物晶体折射率的变化来判断矿物的成分、分区及显微构造等,收到良好的效果。

1 基本原理

Mach-Zender 干涉仪如图 1 所示。 G_1, G_2 为两块材料和厚度完全相同并镀有半透半反膜的分光板, M_1, M_2 为平面反射镜,四个反射面通常安排成近乎相互平行,并且中心光路构成一平行四边形。单色光源 S 置于透镜 L_1 的焦平面上, S 发出的光束经 L_1 准直后由 G_1 分为两束,它们分别经 M_1, M_2 反射,再由 G_2 聚

1) 1994 年 11 月 28 日收到初稿, 1995 年 1 月 17 日收到修改稿。

合后相遇,产生干涉。干涉图样可在置于透镜 L_2 焦平面位置的屏幕上观察到,或用照相机在此位置拍摄下来。

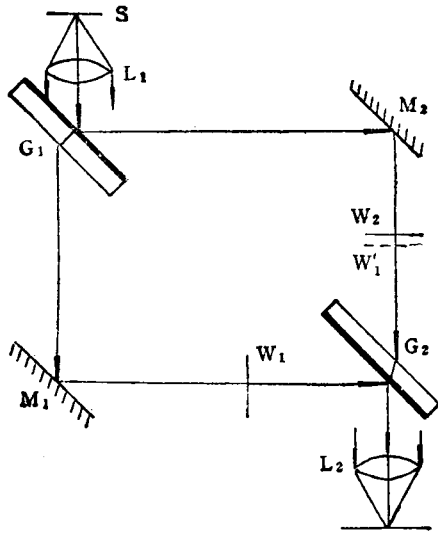


图 1 Mach-Zender 干涉仪

设 M_1 反射的单色平面光波的波前为 W_1 , M_2 相应反射的波前为 W_2 , W_1' 为 W_1 经 G_2 半反射面所成的虚像。由于仪器的四个反射面接近平行,所以 W_2 和 W_1' 也接近相互平行,形成一空气劈尖,则在 W_2 上将形成等厚干涉条纹。条纹相互平行,其疏密取决于 W_2 和 W_1' 夹角的大小。夹角大,条纹密;夹角小,条纹疏。条纹的走向与劈尖的棱平行。如果使 W_2 通过被研究的样品, W_2 将发生变形,因而干涉条纹不再是直线,从干涉图样的变化就可以测量出所研究区域的折射率。

我们把 Mach-Zender 干涉仪与显微镜结合起来。即在两束光路上,沿光的传播方向分别插入两台性能相同的普通显微镜(取下目镜),并令显微镜的主轴与光束重合。其中一台作为光程补偿使用,称为补偿显微镜,另一台称为测量显微镜。其光学系统如图 2 所示。分光束器 A 与合光束器 B 均为两个棱镜胶合而成。G 为半透半反膜, M 为平面反射膜, S 为激光光源, C 为扩束镜, L 为显微目镜, M_i 为测量显微镜, M_i' 为补偿显微镜, I 为待测样品, I' 为补偿片。

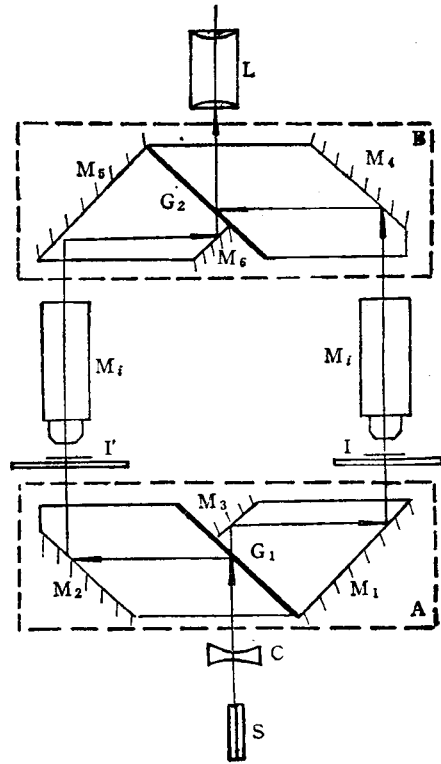


图 2 Mach-Zender 干涉显微镜光学系统

当显微镜物台上不放置任何样品时,由于两束光路是对称的,在目镜中即可观察到干涉条纹,在两台显微镜的物台上分别放入 I 和 I' 时,则干涉条纹在样品区将发生位移,如图 3 所示。这是由于样品和补偿片的插入,使两束相干光在相应区域光程差发生了变化引起的。

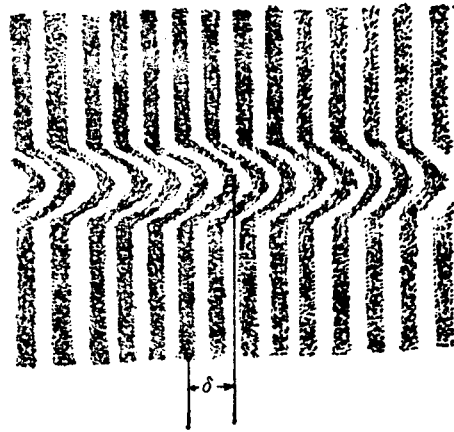


图 3 干涉条纹在样品区的位移

设 I 和 I' 的折射率分别为 n_a 和 n_b , 厚度分别为 t_a 和 t_b , 当 I 和 I' 的表面分别与

光束垂直时, 则两者的光程差为 $n_a t_a - n_b t_b$, 此光程差引起干涉条纹在样品区内发生的位移量与光程差成正比, 在测量中可令比例系数为 1, 用 δ 表示位移量, 则

$$\delta = n_a t_a - n_b t_b^{[3]},$$

当 $t_a = t_b = t$ 时, 有

$$n_a = \frac{\delta}{t} + n_b,$$

若已知 n_b , 并测量出 δ 和 t , 则可用上式计算出样品的折射率。

2 矿物学中的应用

2.1 矿物折射率的测定

不少矿物是两个或两个以上组分构成的固溶体, 其组分及种属名称的确定, 可以通过单矿物化学分析、光学性质测定、X 射线分析、电子探针分析等方法, 最简单的方法就是测定其光学性质。光学性质中应用较多的是折射率、双折射率、光性符号及光轴角、消光角等等。其中尤以折射率最常用^[4], 因为折射率是最基本的光学常数, 很多光学性质与之有关。而且, 许多矿物的折射率受温度的影响可以忽略, 但与组分的关系极为密切。因此, 折射率是确定矿物组分及种属名称的主要依据。所有的光性-成分图上, 一般都离不开折射率的数据。此外, 折射率也和矿物的硬度、磁性、导电性有关。在地质研究中, 折射率能帮助分析岩浆岩的产出深度及相条件, 能有助于分析岩浆岩的含铁量及岩石的时代, 能有利于研究矿物、岩石形成的温度及热液活动的期次等问题。从结构光性矿物学的角度讲, 折射率还与原子结构和晶体结构关系密切^[5]。总之, 它不仅是岩矿鉴定方面的重要数据, 而且也是解决地质矿产等问题中很重要的辅助性资料。

矿物学上测量矿物折射率最常用的方法, 目前仍然普遍使用油浸法^[6]。油浸法的实质是将欲测折射率的矿物置于已知折射率的浸没介质(浸油)中, 通过二者的比较测出矿物的折射率。所需设备为偏光显微镜、折射仪及一套浸

油等。通常这一套浸油包含数十种之多, 顺序排列, 相邻两种浸油的折射率差值约为 0.004—0.006。

对浸油的要求较高, 其中包括: (1) 浸油最好是透明的, 挥发性尽可能小; (2) 是不良溶剂, 与矿物不起化学反应, 化学性质比较稳定, 本身的折射率不易改变; (3) 粘度要适宜, 如粘度大, 则难于散开, 增加测定的困难, 粘度小则不易附着在矿物周围, 也影响测定; (4) 温度系数和色散愈小愈好; (5) 无剧毒、无恶臭、不影响人体健康。

同时, 油浸法还存在某些有待改进之处:

(1) 寻找被测矿物的定向切面及固定该定向切面比较困难; (2) 因为是比较法, 不可避免地要多次更换浸油, 使之与矿物折射率尽可能接近, 手续比较复杂; (3) 油浸法必需要有一台折射仪及一套浸油, 尤其是高折射率的浸油, 多数单位不具备, 并且高折射率的浸油透明度差, 又容易固化。油浸法测量矿物折射率的范围因受棱镜折射率和浸油的限制, 一般为 1.300—1.700, 1.700 以上的折射率很难测量。

而 Mach-Zender 干涉显微术的优点在于:

(1) 测量范围大, 不用浸油, 因此不受浸油和折射仪测量范围的限制;

(2) 测量精度高, 比传统的贝克线法的精度高 10 倍左右;

(3) 可测定矿物的微区成分 (μm 范围);

(4) 用途广, 能研究矿物的微裂隙、双晶、包体、环带、冲击变形的微理等等;

(5) 测试手续简便, 因而测试速度较快, 费用很低, 并且能保持样品的完整性。

2.2 矿物微区成分与显微构造的研究

用干涉显微技术进行微矿物学研究, 只是近 20 年的事情。这方面的工作在国外已有文献报道^[7]; 在国内, 微矿物学方法还处于起步阶段^[8]。第一本有关微矿物学技术及其在地质研究中应用的专著于 1989 年在国内出版, 其第一作者为美籍赵景德博士, 书内的样品测试工作均在美国完成。国内用干涉显微术进行微矿物

学的研究,目前还未见实际工作的报道。

2.2.1 矿物环带

矿物中由于结晶温度的梯度变化和某些常量元素含量的规律性变化,往往形成环带状结构,由内环到外环某种元素含量递增或递减。例如长石环带、辉石环带、石榴石环带等。其形成机理通常与矿物形成过程中的冷却温度、冷却速度、过冷却、水分压变化等有关^[9]。斜长石的一种典型环带如图4所示。

由于环带成分变化,引起折射率的变化,在干涉显微镜下,很明显地观察到干涉条纹在相应微区发生位移,条纹位移量大,则矿物成分变



图4 斜长石的环带素描^[9]
(图中不同的环,成分不同)

表1 矿物折射率测试数据表

样品名称	晶系	分子式	样品方位	t (μm)	δ (μm)	n_b	n_o	标准值 ^[10]	备注
方解石	三方晶系	CaCO_3	与 N_o 轴斜交	45.00	27.00	1.000	1.600	$N_o = 1.658$ $N_e = 1.486$	满足岩矿 工作要求
氟碳铈矿	三方晶系	$(\text{Ce}, \text{La})[\text{CO}_3]\text{F}$	与 N_o 轴斜交	56.00	41.91	1.000	1.748	$N_o = 1.717-1.722$ $N_e = 1.818-1.824$	满足岩矿 工作要求
榍石	单斜晶系	$\text{CaTi}[\text{SiO}_4](\text{O}, \text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$	与 N_g 轴斜交	37.60	35.04	1.000	1.932	$N_g = 1.943$ -2.110	满足岩矿 工作要求
锆石	四方晶系	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	与 N_o 轴斜交	120.00	117.73	1.000	1.981	$N_o = 1.926-1.960$ $N_e = 1.985-2.020$	满足岩矿 工作要求
日光榴石	等轴晶系	$\text{Mn}_3[\text{BeSiO}_4]_3\text{S}_2$		67.50	50.35	1.000	1.746	1.728—1.747	满足岩矿 工作要求
锰铝榴石 (含铁)	等轴晶系	$\text{Mn}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$		52.50	42.74	1.000	1.814	1.800—1.830	满足岩矿 工作要求
钙铝榴石 (榴辉石中石榴石)	等轴晶系	$\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$		60.00	44.16	1.000	1.736	1.735	满足岩矿 工作要求
钙铬榴石	等轴晶系	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2[\text{SiO}_4]_3$		75.00	65.45	1.000	1.873	1.870	满足岩矿 工作要求
锰铝榴石	等轴晶系	$\text{Mn}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$		165.00	131.07	1.000	1.794	1.800	满足岩矿 工作要求
铁铝榴石	等轴晶系	$\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$		60.00	49.86	1.000	1.831	1.830	满足岩矿 工作要求
人工合成立方 氧化锆*	单斜晶系	ZrO_2	与 N_g 轴斜交	105.00	67.86	1.514	2.160	$N_g = 2.200$	满足岩矿 工作要求

* 人工合成立方氧化锆,随杂质含量的多少,其折射率有所变化。

化大,条纹位移量小,则矿物成分变化小。这就便于选择需要的单个环带状晶体,并画出最佳分析剖面线,为电子探针分析作准备。否则探针分析的数目会增加很多,不仅分析费用大幅度增加,而且不能保证分析到晶体最关键的部位,还可能使分析结果的变化规律不清晰。

2.2.2 出溶作用的研究

出溶作用是指两种或两种以上的组分,在高温时形成固溶体,而当温度和压力下降到一定程度时,这些组分彼此分离,各自结晶成独立的矿物,是一种固溶体分离的作用。所分离出

(下转第555页)