

MICRO-STRUCTURE ATLAS OF
FLOAT GLASS SOLID PHASE DEFECTS

浮法玻璃固相缺陷 显微结构图册

姜 宏 赵会峰 王桂荣 等编著

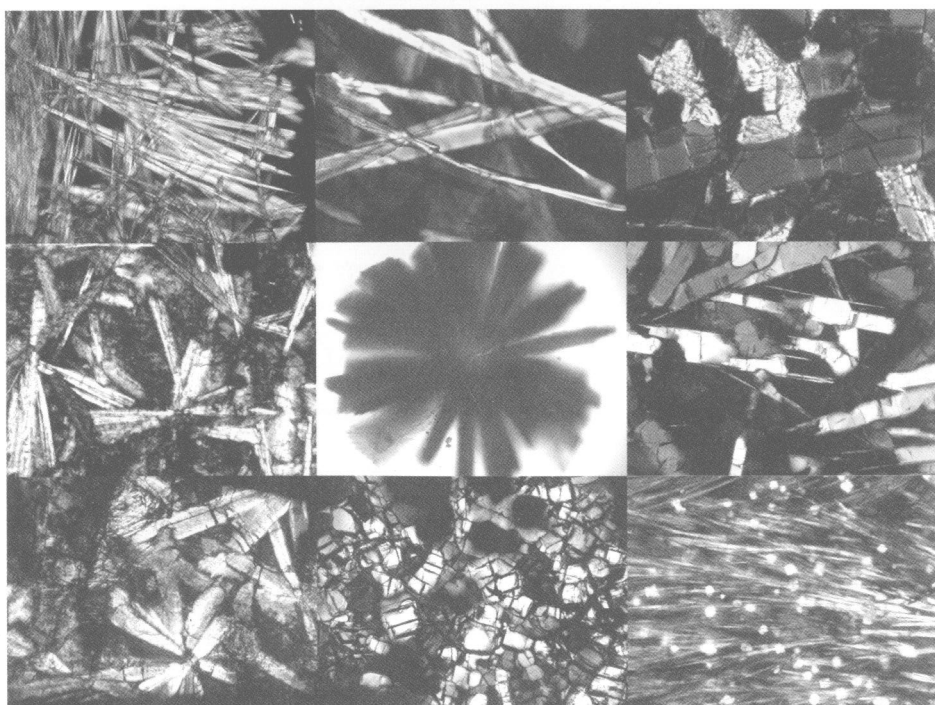


化学工业出版社

MICRO-STRUCTURE ATLAS OF
FLOAT GLASS SOLID PHASE DEFECTS

浮法玻璃固相缺陷 显微结构图册

姜 宏 赵会峰 王桂荣 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书根据国内外浮法玻璃质量控制及诊断技术的最新进展,结合浮法玻璃工艺的生产实践,对十五年来收集的浮法玻璃各类缺陷样品,运用浮法玻璃固相夹杂的检测技术、诊断技术及生产控制技术进行了归类分析和详细介绍。

本书共分5章,从玻璃固相缺陷的现代分析技术入手,通过大量显微结构图片,对耐火材料的侵蚀机理、玻璃熔化过程的晶态与非晶态缺陷、玻璃成型过程中的缺陷等进行了分析,并给出各类缺陷的预防措施和解决方法。

本书文字简练,通俗易懂,图片信息量大,所有列举实例均来自于生产实践,实用性强,对提高浮法玻璃产品质量有很好的参考价值。本书适合于从事玻璃生产、科研开发的技术人员参考,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

浮法玻璃固相缺陷显微结构图册/姜宏等编著. —北京:
化学工业出版社, 2007. 2
ISBN 978-7-5025-5919-9

I. 浮… II. 姜… III. 浮法玻璃-固相-玻璃缺陷-显微
结构-图集 IV. TQ171.72-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第020451号

责任编辑:常青 窦臻
责任校对:顾淑云

装帧设计:郑小红

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京彩云龙印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张20 字数502千字 2007年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00元

版权所有 违者必究

前 言

20 世纪 90 年代以来,我国平板玻璃的总产量已连续多年名列世界之首。经过工程技术人员的不断努力,“洛阳浮法”技术近些年取得较快发展,但是与世界先进浮法技术水平相比,还存在一定差距,其中玻璃质量是主要的差异因素。近年来,随着国内玻璃深加工工业及电子玻璃的不断发展,对玻璃质量提出了新的要求。玻璃制造工艺本身正面临着新的变革,即要求用现代的科学理论和工程技术把玻璃制造技术从传统的经验技艺型提升到科学技术型。

影响浮法玻璃质量的因素诸多,玻璃缺陷是影响玻璃质量的首要因素。玻璃缺陷又分为固相夹杂和气相夹杂。固相夹杂,是指除玻璃气泡以外的条纹、疖瘤、结石、雾斑、划伤等玻璃缺陷。近年来,随着玻璃质量标准的完善,对玻璃缺陷的评判及鉴别方法也需不断完善和提高。自 1987 年秦皇岛玻璃研究院高级工程师屈慧编著的《玻璃工艺结石的岩相形态学鉴定》一书出版以来,虽然杂志上不断有玻璃技术人员发表的关于固相玻璃缺陷的文章,但目前为止还未有一本详细、系统论述玻璃固相夹杂缺陷技术的图书。多年来,业内人士对玻璃固相夹杂的评判和成因鉴别基本处于半理论、半经验状态。为更好地帮助业内人士摆脱经验的束缚,提供更为科学的评判和鉴别依据,我们利用大量业余时间,把十五年来收集的近 5000 个浮法玻璃各类缺陷样品,采用光学偏光显微镜和扫描电子显微镜对其显微结构进行了系统归类,逐一与具有丰富实践经验的工艺技术人员进行讨论分析,并结合缺陷在生产实际中的宏观表现,将各类固相缺陷的成因及预防进行了总结。相信本书会对更多的工艺技术人员、岩相分析人员以及大中专院校的相关专业师生有所帮助。

本书共分五章,从玻璃固相缺陷的现代分析技术入手,对耐火材料的侵蚀机理、玻璃熔化过程的晶态与非晶态缺陷、玻璃成型过程中的缺陷等,利用大量显微结构图片进行了分析,并给出各类缺陷的预防措施和解决方法。为区别黑白线条图和彩色照片图,书中图序采用了两个编码序列。

本书在编写过程中,参考了大量的中外文献资料,并得到高振昕、薛建鹏、王国强、高茗苓、高向伟、王晓红、杜米芳等多位专家和技术人员的指导与帮助,在此谨向他们表示衷心的感谢!

本书主要由姜宏、赵会峰、王桂荣编著完成,参加编写的人员还有有学军、郭晓丽、郅晓、岑治宝、陈静、谢军、李军葛、任红灿等。

由于学识水平所限,书中难免有不妥之处,敬请业内人士批评指正。

作者

2006 年 12 月

目 录

第 1 章 玻璃缺陷显微结构分析技术	1
1.1 概述	1
1.2 晶体及其基本性质	1
1.2.1 晶体的概念	1
1.2.2 晶体的基本性质	2
1.3 晶体生长过程和显微结构的关系	3
1.4 光学显微分析技术	4
1.4.1 光学显微镜的构造	4
1.4.2 光学显微镜的使用方法	6
1.4.3 光学显微镜分析中的术语	8
1.4.4 在单偏光镜下观察晶体	8
1.4.5 在正交偏光镜下观察晶体	10
1.4.6 在锥光镜下观察晶体	11
1.4.7 在反射光镜下观察晶体	11
1.4.8 玻璃缺陷中晶体的光学显微特征	11
1.5 电子显微分析技术	12
1.5.1 扫描电镜的结构及工作原理	12
1.5.2 X 射线能谱仪的结构及工作原理	14
1.5.3 电子显微分析的特点	15
1.6 样品的制备	16
1.6.1 光学显微分析样品制备	16
1.6.2 电子显微分析样品制备	16
第 2 章 玻璃工业用耐火材料的显微结构特征及蚀变过程	18
2.1 概述	18
2.1.1 耐火材料显微结构对性能的影响	18
2.1.2 玻璃用耐火材料的分类	19
2.1.3 玻璃用耐火材料的使用要求	19
2.2 SiO_2 系耐火材料的显微结构及蚀变	20
2.2.1 硅砖的显微结构及蚀变	20
2.2.2 硅质耐火泥料的显微结构及蚀变	22
2.2.3 熔融石英砖的显微结构及蚀变	23
2.3 $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系耐火材料的显微结构及蚀变	24
2.3.1 电熔锆刚玉砖 (AZS 砖) 的显微结构及蚀变	24
2.3.2 烧结锆莫来石砖的显微结构及蚀变	28
2.3.3 烧结锆英石砖的显微结构及蚀变	29

2.3.4 锆英石捣打料的显微结构及蚀变	29
2.4 铝硅质耐火材料的显微结构及蚀变	29
2.4.1 黏土砖的显微结构及蚀变	30
2.4.2 刚玉质耐火材料的显微结构及蚀变	31
2.4.3 硅线石砖的显微结构及蚀变	31
2.4.4 铝硅质耐火泥料的显微结构及蚀变	32
2.4.5 混凝土砖的显微结构及蚀变	32
第3章 玻璃中的玻璃态缺陷	126
3.1 概述	126
3.2 玻璃态缺陷的宏观特征	126
3.3 玻璃态缺陷的显微特征	127
3.4 玻璃态缺陷的成因	127
3.4.1 条纹的成因	127
3.4.2 不同部位产生的条纹	127
3.4.3 疖瘤的成因	128
3.5 玻璃态缺陷的显微结构	128
3.5.1 原料形成的条纹和疖瘤	128
3.5.2 耐火材料形成的条纹和疖瘤	128
3.5.3 窑炉气氛形成的色道	129
3.5.4 杂质引起的条纹和疖瘤	129
3.6 条纹和疖瘤的预防及解决措施	130
第4章 玻璃熔化过程中的固态缺陷	136
4.1 概述	136
4.2 来自原料的结石	136
4.2.1 硅质结石	136
4.2.2 Al-Si 质玻璃结石	137
4.2.3 原料结石的预防及解决措施	137
4.3 耐火材料形成的玻璃结石	137
4.3.1 硅质耐火材料结石的成因及显微结构	137
4.3.2 硅质耐火材料结石的预防及解决措施	139
4.3.3 Al-Si 质耐火材料玻璃结石的成因及显微结构	139
4.3.4 Al-Si 质耐火材料玻璃结石的预防及解决措施	141
4.3.5 锆质耐火材料玻璃结石的成因及显微结构	141
4.3.6 锆质耐火材料玻璃结石的预防及解决措施	143
4.4 外来结石	143
4.4.1 金属结石的显微结构	144
4.4.2 外来非金属结石的显微结构	144
4.4.3 外来结石的预防及解决措施	145
4.5 析晶及其他	145
4.5.1 析晶结石的显微结构	145
4.5.2 析晶结石的预防及解决措施	147
4.5.3 芒硝结石的显微结构	147
4.5.4 芒硝结石的预防及解决措施	147
第5章 浮法玻璃成型过程中的固态缺陷	283

5.1 概述	283
5.2 玻璃上表面缺陷	283
5.2.1 锡石的成因.....	283
5.2.2 锡石的预防及解决措施.....	284
5.2.3 槽内上表面缺陷的成因.....	285
5.2.4 槽内上表面缺陷的预防及解决措施.....	287
5.3 玻璃下表面缺陷	287
5.3.1 沾锡的成因及解决措施.....	287
5.3.2 辊道斑点的成因及解决措施.....	287
参考文献	314

第 1 章 玻璃缺陷显微结构分析技术

1.1 概述

在浮法玻璃生产过程中,从原料加工到配合料在高温熔炉中熔化,再到锡槽中的成形,最后经退火到冷端获得玻璃产品,每一环节中的失控都有可能使玻璃产品产生缺陷。

为了研究玻璃产品中出现缺陷的原因,提高玻璃产品质量,人们采用了各种物理化学方法,其中显微结构研究是最常用、最行之有效的方法。固相玻璃缺陷多数呈晶体状态,因此可以通过研究晶体的形态、构造、性质和晶体生长环境与显微结构的关系等,了解玻璃缺陷的形成机理。同时,通过矿物原料的显微结构及形成玻璃体的熔制过程、玻璃熔窑耐火材料的显微结构及其蚀变、玻璃缺陷的形成机理等,判断玻璃缺陷的来源,从而采取相应的措施以获得质量优良的玻璃产品。

显微结构是指图像中物相的种类、大小、形态和物相之间相互的结合状况。研究材料显微结构的尺寸范围,小至几个或几十个原子,大至 0.1mm 左右,一般其显微结构应有独立的物相与之相联系。显微结构研究的内容,主要是指在研究对象的被观察区域内各物相的种类、大小、形状以及排列结合的情况,以便进一步了解图像中所包含物相的形成先后条件,以及在这些物相形成转变过程中所遵循的规律。此外,还应注意,有时需要同物相所含的化学组成联系起来考察,根据物相鉴定结果去识别特征区域,以表明其中曾经发生过的物理化学变化。因此,玻璃熔窑用耐火材料、玻璃缺陷显微结构研究的任务,主要是根据不同类型显微镜下观察到的显微结构特征,对它们的形成原因、相变过程做出合理的分析和推断。

观察分析玻璃熔窑用耐火材料、玻璃缺陷的显微结构,常用的仪器是光学显微镜,更为精细的主要是透射电子显微镜和扫描电子显微镜。另外,电子探针和各种能谱仪、X 射线衍射仪、电子衍射、差热分析或差动扫描量热仪等配合使用,效果更好,这些仪器使人们能够进一步掌握材料的显微结构及材料化学组成、物相组成与性能之间的关系。不论使用光学显微镜还是电子显微镜,由于所观察到的都是由各个物相所组成的图像,因此,根据测定物相的光学和电子光学特性数据,结合能谱分析得出的元素分布以及物相的结晶生长形态学规律等结果和数据,可以得出基本正确的结论。采用光学显微镜观察时,可以通过光性鉴定或运用特殊显微技术,如暗场、相衬等,使微小的物相能够清楚地被分辨。如果采用电子显微镜观察,则可以配合使用能谱仪或电子探针等匹配手段,以确定微区的物相组成。

1.2 晶体及其基本性质

1.2.1 晶体的概念

晶体是内部质点在三维空间成周期性重复排列的固体,或者说,晶体是具有格子构造的固体。

(1) 晶体的外形 晶体是具有多面体形态的固体,它是由一定的光滑平面围合而成,这种平面称为晶面。晶面相交的直线称为晶棱。晶棱的交点称角顶。晶面、晶棱、角顶为晶体

的界限要素。这些要素有规律的排列构成了有规律的几何多面体形态。

(2) 晶体的内部构造 20 世纪初, 人们应用 X 射线分析的方法, 研究了晶体的内部结构, 发现晶体不论外形如何, 它的内部结构都是有规律排列的, 基本特征是质点 (原子、离子、分子) 在三维空间作有规律的周期重复。成分、环境相同的质点称为相当点。相当点在三维空间做格子状排列, 这种格子称为空间格子。

空间格子的构成要素如下。

结点: 空间格子上位于网格交点的几何点, 它代表晶体结构中的相当点 (质点);

行列: 任意两个结点相连组成行列, 行列中相邻两结点之间的距离称为结点间距;

面网: 通过任意三个不在一直线上的结点所构成的平面称为面网, 面网中单位面积的结点数称为面网密度, 平行面网的面网密度永远相等。

结点、行列、面网构成的一个平行六面体, 称为单位空间格子 (空间格子的最小单位)。

空间格子是无数个单位空间格子在三维空间毫无间隙地重复堆叠。在实际晶体结构中划分出这样相应的单位, 称为晶胞。晶胞是晶体结构的基本组成单位, 由一个晶胞出发, 就能借助平移而重复出整个晶体结构。

通常用空间常数即空间格子上三个棱的绝对长度 (用 $\text{\AA}$ 计量, $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$) a 、 b 、 c 和棱之间的夹角 α 、 β 、 γ 来决定空间格子的形状。

根据空间常数的不同, 可把空间格子分为以下 7 种:

- ① 立方格子: $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$;
- ② 四方格子: $a=b\neq c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$;
- ③ 斜方格子: $a\neq b\neq c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$;
- ④ 单斜格子: $a\neq b\neq c$, $\alpha=\gamma=90^\circ$, $\beta\neq 90^\circ$;
- ⑤ 三斜格子: $a\neq b\neq c$, $\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ$;
- ⑥ 三方格子: $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$;
- ⑦ 六方格子: $a=b\neq c$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$ 。

根据结点在单位空间格子中的分布, 空间格子可分为四个基本类型:

- ① 原始格子 (P): 结点只分布于平行六面体的角顶;
- ② 底心格子 (C): 结点只分布于平行六面体的一对相对面的中心;
- ③ 体心格子 (I): 结点只分布于平行六面体的角顶和体心的中心;
- ④ 面心格子 (F): 结点分布于平行六面体的角顶和各个面的中心。

1.2.2 晶体的基本性质

晶体的基本性质是指一切晶体所共有的性质, 它是由晶体的格子构造所决定的。

(1) 对称性 晶体外部形态上的相等部分, 晶面、晶棱、角顶重复排列的规律性构成了晶体的宏观对称。晶体的宏观对称是由晶体内部格子构造的对称性所决定的。

外形的对称是晶体内部构造对称的反映。因与生长条件有关, 外形对称有限, 内部对称无限。

对称要素如下。

① 对称面: 相应的操作是对面的反映。对称面是一个理想的面, 把晶体分成两个相等的部分, 彼此互相成镜像反映。

② 对称轴: 相应的操作是围绕直线旋转。对称轴是通过晶体中心假想一条直线, 晶体

绕此直线旋转一定角度,可以使相等部分重合。

③ 对称中心:相应的操作是对一点的反映。对称中心是晶体的一点作任意直线,在其反向二端等距离处可遇到晶体的相等部分,晶体的对称中心就是晶体的几何中心,数目只有一个。

根据几次对称轴的数目,把对称晶类分为低级晶族(无高次轴)、中级晶族(只有一个高次轴)、高级晶族(有多个高次轴)。低级晶族包括三斜晶系、单斜晶系、斜方晶系。中级晶族包括三方晶系、四方晶系、六方晶系。高级晶族包括等轴晶系。

(2) 自限性(自范性) 指晶体在适当的条件下可以自发形成几何多面体的性质。

(3) 均一性 指同一晶体的不同部分具有相同的性质。在同一晶体的不同部分,质点的分布是一样的,这就决定了晶体的均一性。

(4) 异向性 指晶体的性质因方向不同而有差异的性质。同一晶体在不同方向上质点的排列是不一样的,因而晶体的性质也随方向不同而有差异。

(5) 最小内能 在相同的热力学条件下,与同种化学成分的非晶质体、液体、气体相比,晶体的内能最小。物体的内能包括质点热运动的动能和质点间的势能。在热力学条件相同的情况下,可以用来比较内能大小的只有势能。势能取决于质点间的距离与排列。

由晶体的均一性可知,内部质点是有规律的排列,这种规律的排列是质点间的引力与斥力达到平衡的结果。质点间距的变化均会引起势能的增加,因此晶体势能最小,具有最小内能。

(6) 稳定性 在相同的热力学条件下,具有相同化学成分的晶体和非晶质体相比,晶体是稳定的。由于晶体具有最小内能,致使晶体内部的质点在格子构造的一定位置上振动,而且其振动不脱离平衡位置,因此,晶体的格子构造不易被破坏,晶体是处于最稳定的状态,具有最大的稳定性。

1.3 晶体生长过程和显微结构的关系

很多物相在固态下都具有同质多晶转变的特性,如 SiO_2 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 等在不同温度下都有相变产生,且相变所产生的体积变化对材料本身的性能影响很大。相变发生时,在材料的显微结构特征上也会有所反映,例如石英的多晶转变:无固定形的 β -石英在 573°C 转变为 α -石英;在有矿化剂存在的情况下, α -石英于 870°C 转变为树枝状、针状 α -鳞石英;在没有矿化剂的情况下, α -石英于 1050°C 转变为树枝状、粒状 α -方石英。因此几种晶体在转变时,从显微结构上即能作出判断。

晶体之所以会出现多种不同的形态(如刚玉有针状、柱状和粒状等),主要与晶体析出及生长的热力学和动力学条件密切相关。因为对于晶体形态最有影响的因素是质点扩散迁移到晶格位置时的黏度、质点迁移速度以及晶体生长所耗用的时间。因此,玻璃熔体冷却过程中的析晶,最重要的影响因素是过冷程度和系统在结晶时玻璃熔体所具有的黏度。再进一步研究结晶的条件,还可以区分为均匀冷却结晶和非均匀冷却结晶。

同一种晶体从相同的系统中析出时,如果过冷度不同,则显微结构上将有明显的差别。过冷度小(接近于液-固相平衡结晶温度),这时,液体黏度小,一般可以长成粗粒状、板状;过冷度大,液体黏度较大,多数趋向于长成针状、纤维状、羽状、放射状、骨架状或树枝状;过冷度大到一定程度,则来不及产生析晶。例如,在不同黏度和过冷度条件下,从玻璃中析出的失透石晶体在显微结构形态上具有显著差别。柱状的失透石应是由窑内熔体在不

易流区缓慢生长而成，而集束纤维状的失透石，应是在冷却过程中快速析晶的产物。

当材料从熔体冷却过程中结晶，由于系统内组成分布不均匀，或是温度下降有些快，或是当温度下降到一定程度以后熔体的黏度很快升高，这时，就可能出现所谓非平衡条件下的结晶，这种非平衡条件下的结晶过程对物相、组成、显微结构产生的影响十分突出。当系统内组成分布不均时，析出的晶相很可能偏离原应有的平均化学组成，如玻璃中出现的硅灰石、透辉石等析晶常属于此类现象。玻璃局部化学组成与原设计化学组成（或平均化学组成）的偏离，不仅使某些原来不应出现的晶相能在样品中产生，而原来认为不易产生分相的设计成分，也会明显地出现液相不混溶现象。

钠钙硅酸盐玻璃中，CaO 的设计含量一般不会超过 14%，如果配合料混合不均，就有可能在玻璃液内产生硅灰石（ $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）析晶，或者在富含 SiO_2 的条纹和疖瘤中析出鳞石英或方石英。

耐火材料在烧结和使用过程中所发生的反应，一般属于非平衡条件下的结晶，而显微结构中物相的形成可以用相平衡关系来解释。在不同玻璃窑炉中，耐火材料受玻璃熔体或飞料的侵蚀，由于经历时间长，其反应形成的物相和显微结构可以同相平衡条件对应起来。通过样品显微结构的研究，可以了解耐火材料受侵蚀变化的机理。如玻璃液中 Na_2O 对铝硅质耐火材料作用时，则形成莫来石、氧化铝、霞石等矿物，基本上是按相平衡规律变化的（见图 1-a）。对于使用过的耐火材料，从玻璃熔窑工作面取样检测分析其显微结构变化，可以推知耐火材料侵蚀变化的情况。

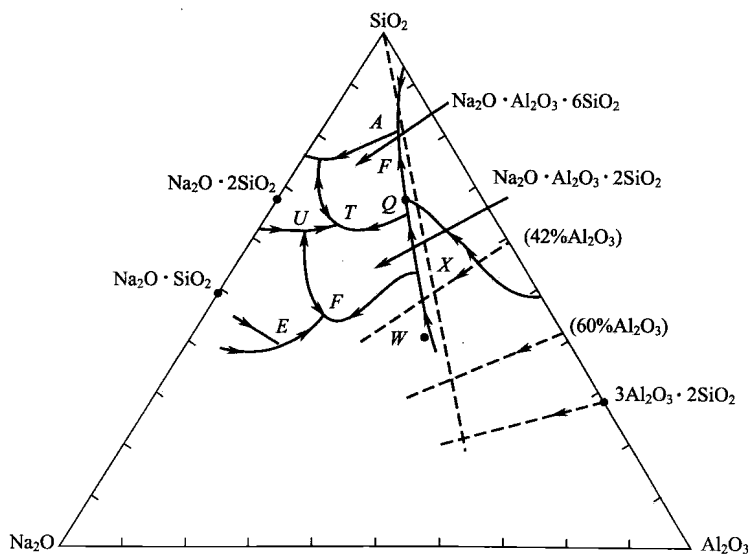


图 1-a 铝硅质耐火材料受含 Na_2O 玻璃熔体侵蚀而形成的晶相间转化关系在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 相图中的表示

1.4 光学显微分析技术

1.4.1 光学显微镜的构造

偏光显微镜是物质显微结构研究的最有效、最普遍的工具之一。随着科学技术的发展，偏光显微镜的鉴定技术不断提高，已由原来的定性发展到定量，可以直接接入数码相机和计

算机, 为人们的研究提供了便利。最常用偏光显微镜国内的生产厂家有江南光学仪器厂和上海光学仪器厂, 国外厂家有德国的徕卡公司和蔡司公司。偏光显微镜虽然型号繁多, 但主要构造大同小异, 现以德国徕卡 DMLP 型偏光显微镜为例叙述显微镜的构造 (见图 1-b)。

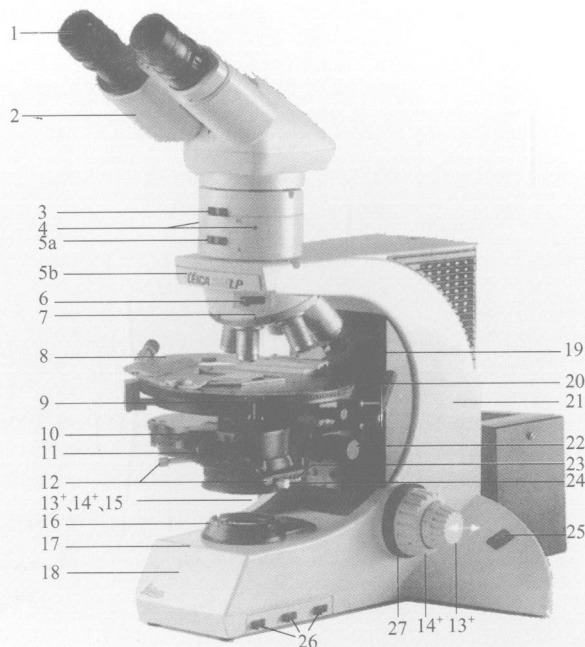


图 1-b DMLP 型金相偏光显微镜

1—目镜 (可调节屈光度并带有防眩光保护罩); 2—调节瞳间距; 3—勃氏镜; 4—勃氏镜对中孔; 5a—偏光模块中的检偏镜; 5b—镜架上的检偏镜插孔; 6—补偿片插孔; 7—物镜对中调节孔; 8—样品夹; 9—转台夹; 10—聚光镜的孔径光阑; 11—聚光镜转盘 (可放全波长、四分之一波长的补偿片或相衬环); 12—聚光镜的对中螺丝; 13—微调焦 (在右手控制); 14—粗调焦 (在右手控制); 15—粗调焦的扭矩调节; 16—主开关; 17—视场光阑; 18—亮度调节 (电压); 19—45 度“啮啮”止住; 20—放置内六角扳手的孔 (对中调节用的); 21—主机架; 22—聚光镜高度调节钮; 23—止住聚光镜高度; 24—透射光起偏镜 (可带 32mm 直径的全波长、四分之一波长的补偿片); 25—透射、反射光照明转换开关; 26—滤光片盒; 27—止住载物台高度调节

① 目镜: 目镜只是把物镜放大的实像进一步放大为虚像便于观看。一般有 $5\times$ 、 $10\times$ 两个目镜, 目镜中往往带有十字丝或分度尺。

目镜基本上由两组有一定距离的正透镜组成, 靠近眼睛的叫眼透镜。在眼透镜之下, 靠近物镜所成实像位置的透镜叫场透镜, 它的功用是使视野边缘的成像光线向内折射后, 也能射入眼透镜中, 使矿物影像均匀明亮。否则, 为了接受物镜射来的全部成像光线, 眼透镜需要非常大而使制造困难和使用不便。偏光显微镜所用目镜的眼透镜, 都有螺旋可以旋转伸缩调焦, 可使焦平面上的十字丝或数尺等准焦清晰。此外, 显微摄影时伸缩眼透镜准焦可以不改变机械筒长, 从而保证了物镜生成的影像高质量。

在显微镜下观察时, 通常不能看到整个薄片, 只能看到一小部分, 这部分包在目镜光圈所围成的亮圆内。这个亮圆叫作“视野 (或视域、视场)”。

② 勃氏镜: 安装在目镜与上偏光镜之间的镜筒内部, 用筒外板柄控制加入或退出光路。勃氏镜的正透镜组相当于一个望远放大镜, 加入显微镜的光路后, 视野中呈现的现象与取下目镜直接看镜筒内时相同, 但比直接看要大而且清楚。勃氏镜的用途是观察干涉图和偏光

图，并且在调节显微镜的孔径光圈时使用。在观察干涉图或偏光图时，为了使这些图像能准焦更清楚，可用勃氏镜的调焦螺旋调焦。当被观察的矿物颗粒太小，使用最高倍物镜矿物也只占视野的一小部分，此时除了缩小显微镜的视野光圈使矿物充满视野中心外，还要用勃氏镜的校正中心螺旋将此细小矿物的干涉图或偏光图移至正中央，然后缩小勃氏镜的光圈，使这些图像最清晰后再观测。

勃氏镜还有两种用途，一是不用物镜，仅用勃氏镜配合目镜也可以成像，用于极低倍的观察及低倍摄影；二是加上 63/0.85 或 40/0.63 的大孔径物镜，推入勃氏镜后适当地调焦，可以观察要求景深大的细长物体。

③ 偏光镜：每台偏光显微镜上都装有两个偏光镜，一个是起偏镜，另一个是分析镜。起偏镜位于物台下聚光镜的下面，故又称下偏光镜。起偏镜的作用是使入射的自然光变成振动方向固定的直线偏光。分析镜的外形为一长方形金属板，上有两个圆孔，一孔装有偏光镜，另一为空白孔。它装在物镜之上的镜筒中段，可以推拉使偏光镜移入或移出显微镜光路。分析镜因装在显微镜的上部，故又称上偏光镜。它的安装方位是与起偏镜正交。分析镜一般都可以旋转，以便调节其振动方向，当刻度旋转至 90° 时，上下偏光镜的振动方向互相垂直（正交），视野中呈完全黑暗，这种现象叫作“消光”。

④ 聚光镜：位于样品台之下，下偏光镜之上。聚光镜由一片至数片透镜组成，组合后为正透镜系统，具有会聚光线的性质。聚光镜的功用有两种，一是将光源的光聚成光锥照明被观察物体，并且照明孔径可变，使之尽量与所用物镜孔径相符或相近；二是聚光镜能在薄片上形成光源（灯丝影）的高质量影像。

聚光镜架上有二至三个校正中心螺旋，可以校正聚光镜中心。聚光镜高度调节钮可以使聚光镜升降，这对于调节聚光镜的照明非常重要。

⑤ 载物台：是一个可以转动的圆形平台，用以承载被观察的样片。载物台的平面一定要与显微镜的光轴垂直，这样才能保证物体的影像不变形。载物台边缘有刻度（ $0^\circ \sim 360^\circ$ ），并有游标尺，可以读出旋转的角度。载物台由固定螺丝固定。载物台中央有一个圆孔，是光线的通道。物台上的样品夹，用以固定样片。载物台可以根据需要进行上下高度调节。

⑥ 物镜：是决定显微镜成像性能的重要因素，其价值约占整个显微镜的 $1/5 \sim 1/2$ 。它是由 1~5 组复式透镜组成的。每台显微镜有 3~7 个不同放大倍数的物镜，上图所示显微镜是 5 个。每个物镜上刻有放大倍数、数值孔径。通常放大倍数越高的物镜，数值孔径越大。同一放大倍数的物镜，数值孔径越大，分辨率越高。物镜的分辨率就是显微镜的分辨率。

显微镜的总放大倍数为目镜放大倍数与物镜放大倍数的乘积，例如用 10 倍的物镜和 10 倍的目镜，则总放大倍数为 100 倍。

1.4.2 光学显微镜的使用方法

(1) 装卸镜头

① 装目镜：将选用的目镜插入镜筒上端，使其十字丝位于东西、南北方向。

② 装卸物镜：因显微镜的型号不同，物镜的装卸有下列几种情况。

a. 弹簧夹型：将物镜上的小钉夹于弹簧夹的凹陷处，即可卡住物镜。

b. 螺丝扣型：将选用的物镜装在镜筒下的螺丝扣上，拧紧为止。

c. 转盘型：先将物镜安装在一个可以转动的圆盘上，再将需用的物镜转到镜筒正下方（似有阻碍时）为止，转过了或未转到都会使物镜偏离镜筒中轴位置。

(2) 调节照明(对光)系统 装上中倍物镜和目镜后,推出上偏光镜和勃氏镜,打开锁光圈,转动反光镜对准光源,直到视域最亮为止。如果视域总是调整不明亮,则可去掉目镜,从镜筒内观察光源的像,若看不见光源,说明反光镜位置不对,或有别的障阻。去掉障阻,转动反光镜直到光源照亮视域或其中央部分为止。再装上目镜,视域可达到最明亮。

(3) 调节焦距(准焦) 调节焦距主要是为了能使物像更加清晰,其步骤如下。

① 将欲观察的薄片置于物台上,用夹子夹紧。

② 从侧面看着镜头,旋转粗动螺丝,将镜筒下降到最低的位置(高倍镜头要下降到几乎与薄片接触为止)。

③ 从目镜中观察,拧动粗动螺丝使镜筒缓缓向上,直到视域中物像清晰为止。如果物像不够清晰,可转动微动螺丝使之清晰。

准焦后,物镜与薄片之间的距离(工作距离)因放大倍数不同而不同。放大倍数低,二者距离长,反之间距短。所以,调节高倍物镜时应特别小心,切忌眼睛只看镜筒里面而下降镜筒,这样最容易压碎薄片而使镜头损坏。

在进行显微镜观察时,要学会两眼同时睁开看,这样既可保护视力,又便于绘图记录。

(4) 校正中心 偏光显微镜镜筒的轴应与载物台的转轴一致,如果此二轴有少许不一致,就必须进行中心校正。中心校正的原理很简单,首先在薄片中寻找一小黑点移至十字丝的中心,转动物台 360° ,如果镜筒的轴与载物台的转轴一致,则黑点始终保持原位不动,如果二轴有少许不一致,载物台转动一周,黑点即离开十字丝中心绕一个小圆圈然后再回到十字丝中心。显然十字丝中心代表镜筒轴的位置,而小圆圈的圆心代表载物台的转轴位置。中心校正的目的,就是要使镜筒轴与载物台的转轴重合一致。由于载物台的转轴是固定不动的,因此只能改变镜筒轴的位置,即将两个内六角扳手套在对中调节孔内转动进行中心校正(图 1-b 中的 20),使镜筒轴移向载物台的转轴。校正中心的具体步骤如下。

① 将物镜安装在正确的位置上,准焦后,在薄片中选任一小黑点置于十字丝交点。

② 转动载物台 180° ,小黑点移至十字丝中心以外一个位置 a ,此时小黑点距十字丝中心 b 最远。

③ 扭动校正螺丝,使小黑点移回 ab 距离的一半。

④ 移动薄片,再使小黑点位于十字丝中心,转动载物台,小黑点所绕圆圈比第一次要小。然后再转动校正螺丝使小黑点移回一半距离,如此循环,直到小黑点在十字丝中心时不因载物台的转动而移动,中心校正才算完毕。

若偏心很大,旋转物台时,小黑点由十字丝交点移至视域之外。这时扭转校正螺丝,估计地使小黑点向相反方向移动某一距离。再移动薄片使一小黑点至十字丝交点,旋转物台,可能小黑点已缩小到在视域内转动。此时可按上述偏心小的方法继续校正。

(5) 偏光镜的校正

① 确定下偏光镜的振动方向。在薄片中找到一个具有解理缝的黑云母矿物,置视域中心。转动载物台,使黑云母颜色达到最深为止,此时黑云母解理缝的方向,即为下偏光镜的振动方向。当黑云母颜色达到最深时,如果黑云母解理缝方向与目镜十字丝之一不平行,转动物台使黑云母解理缝方向与目镜十字丝之一平行,旋转下偏光镜至黑云母颜色变至最深为止。

② 上、下偏光镜振动方向是否正交。推入上偏光镜,视域黑暗,证明上、下偏光镜的振动方向正交。若视域不黑暗,则转动上偏光镜,直到视域最黑为止;有些显微镜的上偏光镜是固定的,此时转动下偏光镜,直到视域黑暗为止。视域黑暗,说明上、下偏光镜的振动

方向已正交。

③ 上、下偏光镜的振动方向是否与十字丝平行。为了校正上、下偏光镜振动方向与十字丝平行，仍用具有解理缝的黑云母，使其解理缝平行于十字丝之一，推出上偏光镜，转动下偏光镜，使黑云母的颜色最深，此时目镜十字丝之一已平行于下偏光镜的振动方向。拿掉薄片，推入上偏光镜，看视域是否全黑，如全黑说明上、下偏光镜振动方向正交并与东西、南北方向的十字丝平行；若视域不全黑，可转动上偏光镜，使视域达到全黑为止。

1.4.3 光学显微镜分析中的术语

光学显微分析技术就是利用光学显微镜分析晶体光学性质的技术，包括晶体在单偏光下、正交光下、锥光下、反射光下的性质。分析中有关的几个术语如下。

① 偏光：灯光、太阳光等向各个方向发射的普通光叫自然光，在垂直于光波传播方向上的平面内作任意方向的振动。自然光在经过偏光作用后，只在一个固定方向上振动，叫偏光。

② 正交：上偏光、下偏光同时使用，两个偏光镜的振动方向互相垂直。

③ 均质体：是一种无规则的无定形体，内部构造、光学性质各方向相同。光（包括自然光和偏光）射入均质体后，不改变振动方向和特点，光在任意方向的传播和折射，速度相等，折射率不变，因而均质体只有一个折射率。玻璃、树脂胶及等轴晶系的晶体（萤石、方镁石等）均属均质体。

④ 非均质体：内部构造、光学性质随方向不同而异。光波在非均质体中传播时，传播速度随方向不同而异，折射率不等。自然光进入非均质体后，原来是任意方向振动的光波，变成两个振动方向相互垂直的光波，并且这两个光波的传播速度除个别方向外，一般是不等的。因此当光射入非均质体时，将产生两条折射光线，这种现象叫作双折射。除等轴晶系以外的所有晶体，属非均质体。

光波射入非均质体中只有个别方向不发生双折射现象，非均质体中不发生双折射的方向称为光轴。非均质体分为两类，只有一根光轴的称一轴晶，有两根光轴的称二轴晶。

⑤ 光率体：表示晶体中光波振动方向与折射率之间关系的光性指示体。光波在均质体中传播，向任何方向的折射率相等，光率体是一个圆球体（高级晶族萤石的光率体也是圆球体）；光波在非均质体中传播，在中级晶族随着方向不同而不同，光率体是一个椭圆球体。从干涉图可以看出是一轴晶还是二轴晶。

1.4.4 在单偏光镜下观察晶体

在单偏光镜下观察晶体，可以观察晶体的形态、颗粒大小、解理、颜色、吸收性、多色性、包裹体、突起、糙面、贝壳线等。

① 晶体的形状、大小和晶体的完整程度，常与形成的条件、析晶的顺序有密切关系。因此研究晶体的形态，可以帮助我们鉴定矿物，并推断它们的形成条件。一般情况下，呈规则的多边形、晶棱全为直线、晶形完整的晶体（称为自形晶），析晶早，结晶能力强，来自物理化学条件适宜于晶体生长的环境。部分晶棱为直线、部分为不规则的曲线、晶形较完整、但比自形晶差的晶体（称为半自形晶），析晶较晚。呈不规则的粒状、晶棱均为曲线的晶体（称为他形晶），析晶最晚或是在熔体温度下降较快时析晶。

② 在单偏光镜下观察样片时,由于矿物对白光中七色光波有选择性地吸收,吸收程度不同,而使矿物呈现一定的颜色。如矿物吸收除绿光外的其余光,该矿物呈绿色;玻璃对白光中七色光波吸收程度相同,故为无色透明。所观察矿物颜色的深浅与其吸收能力有关,吸收能力强的颜色深;还与样片厚度有关,厚度越厚颜色越深。

均质体矿物各向同性,光学性质各个方向一致,即对于不同振动方向的光波选择吸收相同,所以均质体矿物的颜色及颜色深浅,不因光波的振动方向而发生变化。但对于非均质体,在单偏光镜下旋转载物台时,矿物的颜色和颜色深浅要发生变化。这种由于光波在矿物晶体中的振动方向不同,使矿物的颜色随着样片安放位置不同而改变的现象称为多色性。不同方向吸收光多少不同,颜色深浅发生变化的现象称为吸收性。多色性与所观察样片厚度有关,样片越厚,多色性越显著。

③ 一个大晶体包裹着一些细小的晶体或其他物质,被包围的物质叫包裹体。包裹体可以是气体、液体、其他晶体或同种晶体。从包裹体的成分和形态可以分析出晶体生长时的物理化学环境。

④ 在单偏光镜下观察晶体时,晶体与非晶体接触形成的边界线,使晶体有些微升高的现象称为突起。突起仅仅是人的视觉感觉,主要是晶体折射率与周围玻璃或树脂胶折射率的差别造成。折射率差别越大,突起越高,二者关系如表 1-1 所示。晶体折射率大于树脂胶或玻璃体时为正突起,反之为负突起。突起分为低、中等、高、很高四个等级。双折射率特别大的晶体,如方解石,不同方向上突起不同。

表 1-1 突起与折射率的关系

突 起	折射率	突 起	折射率
负突起	<1.54 (钠钙硅玻璃的折射率)	正高突起	$1.66 \sim 1.78$
正低突起	$1.54 \sim 1.6$	正极高突起	>1.78
正中突起	$1.6 \sim 1.66$		

⑤ 贝克线是出现在两种不同介质交界旁的一条明亮的界线。如果贝克线随镜筒上提而移向晶体周界内部,则晶体是正突起(折射率大),否则为负突起(折射率小)。

观察贝克线特别是突起低的晶体的贝克线时,光圈放小,明亮度弱些。

⑥ 在单偏光镜下观察晶体表面时,某些晶体表面较为光滑,某些晶体表面呈麻点状,特别是在突起高或很高的晶体表面上。有粗糙不平滑的感觉叫糙面,糙面是晶体与树脂胶或玻璃的折射率相差较大的一个标志。

⑦ 晶体沿着一定方向裂开成光滑平面的性质称为解理。裂开的面称为解理面。解理面一般平行于晶面。解理具有方向性,与晶面或晶轴有一定关系。解理面与切面的交线,称为解理缝。根据发育的完善程度,解理一般分为以下几级:

a. 极完全解理,解理缝呈细密而连续的直线,解理面发育完好,大而平坦,如云母的解理;

b. 完全解理,解理缝较粗,一条缝未完全贯穿,解理面显著,平整,如长石、方解石的解理;

c. 不完全解理,解理缝断断续续,勉强能看出一个大致的方向,解理面不明显,断续可见;

d. 无解理(或极不完全解理),当矿物受力后不能沿一定的结晶方向裂开成平面,而破

裂成不规则、不平坦的断面，成为断口。

1.4.5 在正交偏光镜下观察晶体

正交偏光镜就是推入上偏光镜和下偏光镜一起使用。载物台上不放任何样片时，在正交偏光镜下观察，视域是黑暗的。因为光波通过下偏光镜后，其振动方向被限制在下偏光镜的振动面内，而上偏光镜的振动方向与下偏光镜的振动方向垂直，使光波被阻挡不能通过。放入晶体样片后，由于晶体的性质和切片方向不同，将出现消光和干涉等光学现象。

(1) 消光 晶体在正交偏光镜下呈现黑暗的现象称为消光。均质性晶体在正交偏光镜下观察，转动载物台 360° ，视域均为暗色，消光现象没有改变，这种现象称为全消光。非均质性晶体在正交偏光镜下观察，转动载物台，原来暗的地方变亮，明亮的会变暗，转动一周有四次明暗交替，故非均质性晶体出现四次消光。非均质性晶体除垂直光轴切面以外的任何切面，在正交偏光镜下处于消光的位置，称为消光位。消光有三种类型：平行消光、对称消光和斜消光。

① 平行消光：当晶体消光时，解理缝、双晶缝或晶棱与目镜十字丝平行。

② 对称消光：当一个切面具有两组解理缝的晶体消光时，目镜十字丝平分两组解理的夹角。

③ 斜消光：当晶体消光时，解理缝、双晶缝或晶棱与目镜十字丝斜交。

(2) 干涉 非均质性晶体除垂直光轴以外的任意方向切面不在消光位时，由于干涉作用，会出现不同的颜色和亮度，有的还绚丽多彩。当入射光为单色光时，干涉结果呈明暗交替现象。当入射光为白光时，由于白光由七种不同波长的单色光组成，有一定的光程差，当光程差相当或接近于其中一部分单色光半波长的偶数倍时，使这部分光消失或减弱；当光程差相当或接近于另一部分单色光半波长的奇数倍时，使另一部分光加强。所有未消失的各色光混合形成与该光程差相应的混合色，称为干涉色。

(3) 正延性、负延性的测量 不少晶体在形态上具有沿某一方向延长的特性，如针状、纤维状、柱状等。通常此方向与晶体的某一结晶轴平行或近于平行，因此，与该晶轴平行的切面就呈延长的形态。晶体的延性符号有两种：正延性和负延性。测试方法如下。

① 正延性：竖的十字丝转 45° 消光，插入石膏板，晶体颜色为蓝色时为正延性。

② 负延性：竖的十字丝转 45° 消光，插入石膏板，晶体颜色为黄色时为负延性。

(4) 双晶的观察 晶体中的双晶在正交偏光镜下，表现为相邻两个单体不同时消光，呈现一明一暗的现象，这是由于构成双晶的两个单体中，一个单体围绕另一个单体旋转 180° ，而使两个单体的光率体椭圆半径的方位不同。双晶中两个单体的结合面称双晶结合面。双晶结合面与薄片平面的交线称双晶缝，一般较平直。

根据双晶中单体的数目和结合情况，可将双晶划分为下列几种类型。

① 简单双晶：仅由两个单体组成。在正交偏光镜下，一个消光呈黑暗，一个不消光呈明亮。旋转物台时，明暗交替。

② 聚片双晶：双晶结合面彼此平行，在正交偏光镜下呈聚片状。旋转物台时，相邻的奇数和偶数组单体轮流消光，明暗交替。

③ 联合双晶：双晶结合面不平行。按单体数目分为三连晶、四连晶和六连晶。此外还有特殊的格子双晶。