



国外 金属矿床地质

(一)

层状及层控铜矿床

冶金工业部天津地质调查所情报室

一九七九年七月

说 明

本期刊登的文章多系英语学习班学员结业后的翻译练习，作为学习成绩汇报请大家审阅。因水平有限，错误难免，欢迎读者批评指正。

主要插图为徐国华、刘兰英、郑汝华清绘，谨此致谢。

目 录

1 印度西部阿姆伯吉—德力前寒武纪层状硫化物矿床中的矿石的多相变 用质作.....	1
2 魁北克瓦尔多卢文铜矿床周围的主要元素与微量元素的岩石化学异常.....	15
3 西格陵兰早前寒武纪伊苏亚上地壳带在条带状含铁建造和玄武质凝灰 层控铜硫化物岩中的.....	21
4 Bleida 一个上元古代大陆边缘中的火山沉积铜矿床.....	29
5 芬兰奥托孔普区前寒武纪铜硫化物矿床的成因.....	37
6 罗得西亚(津巴布韦)沙姆罗克层状铜矿床地质特征.....	51
7 第五届国际金属矿床成因会议.....	74

印度西部阿姆伯吉—德力 (Ambaji—Deri)

前寒武纪层状块状硫化物矿床

中矿石的多相变质作用

M. 德伯 (德里大学地质系)

伴生在堇青—直闪岩中的块状、层状锌—铅—铜硫化物矿床产在西印度的阿姆伯吉和德力的邻接区。层间夹有闪岩并被酸性到中性深成岩侵入，准沉积围岩属于前寒武纪德里上界(上组)。经详细矿相研究的金属矿物有：闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿(单斜晶系或六方晶系)、磁铁矿、钛铁矿、金红石、毒砂、辉钼矿、方黄铜矿、马基诺矿、块硫锑铅矿、硫锑铁矿、硫锑铅矿、辉砷铜矿、砷黝铜矿、自然铋、自然银、辉铜矿、铜兰。在矿石中常见的硫化物—硅酸盐片理，硫化物矿脉的流动和围绕变晶分布预示出早期褶皱作用(F_1)的区域发展和在绿片岩条件下岩石的区域变质作用。后被含有硫化物和硅酸盐的角闪岩结构所透加，并且包含有在后来的压热变质作用相和相关的构造作用条件下由于温度降低和粒状硫化物的生成而成的微结构(F_2)。最后，有的变形特征和一些特殊的组构象方铅矿中的碳甲铁表壳，闪锌矿中的次级纹理在区域构造作用减弱阶段的弱变形幕(F_3)期间发展了。在热变质作用期间矿石中的组分变化是极少的。

摘 言

金属矿床变质特征认识的重要性，特别是在前寒武纪地区确定矿的形成时间及关于围岩的地质演化已经被一些工作者强调过(例如：唐纳德1967，沃克思1969，斯坦顿1972，穆克吉1976)。在很多情况下，这导致对有关矿的成因的一些可能过程的限制，并且有助于建立矿床成因的可能模式。在空间上与靠近于酸性侵入体的堇青直闪岩伴生的硫化矿能够通过反映这些岩石成因的很多互异过程中的任一过程来完成(例如：拉姆齐和戴维森1974，詹姆斯等1978)。然而，假如热变质作用在这些矿中被确认了，那么，不是交代作用而是侵入过程与侵入作用有联系，对硫化矿的生成将可靠的显示出来。

本文的意图是记录在西印度晚前寒武纪和堇青直闪岩伴生的两个邻近的块状硫化物产状的矿物学和描述重要的变质矿石组构。矿石组构的发育与围岩变质作用演化期有关。依赖于

变质作用的矿物调整和在组分上不同的变质集合体中相似的金属矿物的形成已被讨论过了。这篇文章是作者(德伯1973)早期准备好的资料的延续。

地质环境

块状、层状锌—铅—铜矿位于腊贾斯坦邦内斯劳贺区的德力和 詰 拉 特邦内巴拿斯堪兹区的阿姆伯吉(图1)。属于晚前寒武纪德里上界的阿贾瓦统下部的褶皱及多相变质的岩石南北延伸八公里。(库尔森, 1933; 赫伦和格施, 1938)。矿石优先富集在变质的锌质和钙镁质岩石的烘烤透镜体中, 象绿泥—蓝青直闪岩、石英—绿泥—透闪片岩, 镁橄榄石大理岩等。其内包有泥砂质沉积物或正闪岩。酸性到中性的火成侵入体在矿带内或靠近矿带出现。构造研究(德伯1974)已经证明: 伴随区域上最初变形(F_1)的区域变质作用属高级绿片岩相环境。角闪石角闪岩相条件下的热变质作用显然与区域内深成岩的侵入有关, 在先前的片理上广泛地迭加了角闪岩组构并且明显地是和变形的第二相(F_2)同时期的。最后的变形相(F_3)表现出岩石中陡倾斜褶皱的发育。

这篇文章是以矿石多相变质性质的多种地质证据和地质环境的分析及可利用的地球化学资料为根据的, 德伯(1978)已经提出高镁或高钙镁沉积物中硫化物的共生(成岩)成因模式。

成矿作用

阿姆伯吉和德力硫化矿作为透镜状到板状体的典型“层状”产出(斯坦顿1972), 根据它们的金属含量和致密状的性质其大部分可叫做“块状硫化物”。仅局部有小角度不整合。按一般的含量次序锌、铅和铜是主要金属。但是, 这些主要金属的相对浓度在矿体中有变化, 在单个矿的透镜体内也有变化。从钻孔资料推出: (根据1972年印度地质调查所资料)。

	Zn	Pb	Cu
阿姆伯吉	6.0%	5.5%	2.0%
德力	9.0%	6.8%	1.1%

矿石中铁含量变化很大。矿石中的少量金属有: Mo, Ag, As, Bi, Cd, Co和Ni。

散布着自形黄铁矿晶体的块状闪锌矿矿石是最普遍的。富方铅矿和富黄铜矿矿石的丰度次之。黄铁矿是普遍存在的成分, 并且足以形成块状或条带状黄铁矿矿石。磁黄铁矿矿石产在以磁铁矿为主要成分的德瑞局部地区。这种矿石也同样显示了条带状, 其条带厚度从几毫米到几厘米。其条带通过黄铁矿和闪锌矿的相互浓集或者在石英、黑云母、黄铁矿和黄铜矿中交互成层被很好地表现出来了。

区域上铜和铅—锌矿通常倾向于形成独立的矿体, 铜矿体产在较砂质的单元中, 而铅—锌矿则产在含较多钙、镁质的岩石中。(尽管在一些情况下铅明显地富集在下部), 在混合矿体中也没有明显的金属分带性。

矿石矿物学。

从30个钻孔和地下工程的矿石中取的大约200个光片和薄—光片在卡尔蔡司万能显微镜下进行了阿姆伯吉—德力硫化物矿物学的研究。

富闪锌矿矿石的矿物学是简单的, 除闪锌矿外还有含量不定的方铅矿和黄铜矿及微量辉钼矿。粒径0.03—4mm的自形黄铁矿颗粒赋于块状闪锌矿特征并且既以孤立的变晶产出也在

黄铁矿层中产出。方铅矿在典型的角页岩体内是主要的硫化物矿物。这种角页岩中绿泥石和角闪石集合体，粗粒黄铁矿斑状变晶，次圆粒状闪锌矿和很多小包体是常见的。长度为0.03—0.21mm的片状辉钼矿呈迭结状并且强烈波状消光形成最普遍的包体。方铅矿中不规则到次圆斑状砷黧铜矿是存在的，并且变嵌晶包含它的大量细粒椭圆包体。该矿物（砷黧铜矿）同样在方铅矿富矿石中沿着方铅矿—黄铜矿或者闪锌矿—黄铜矿分界面出现。细粒的不规则的，长方形的或椭圆斑状的硫锑铁矿产在方铅矿石的基质中。在磁黄铁矿中自然铋的少量蠕虫状共生在方铅矿石中同样见到。在方铅矿中有一些很高反射力的白色微粒经试验定为自然银。

黄铜矿富矿石有最复杂的矿物组合。这些矿石一般包含：黄铜矿+黄铁矿+磁铁矿+闪锌矿+方铅矿，有或者没有磁黄铁矿、方黄铜矿、辉钼矿、马基诺矿和毒砂。磁黄铁矿呈分散粒状产出。方黄铜矿（不是等轴晶系）以溶离叶片状出现，其变形方向较黄铜矿的一个结晶方向为多并且与黄铁矿密切伴生。马基诺矿常呈针状和蠕虫状集合体出现，这种蠕虫集合体长度0.09mm以上。毒砂沿着颗粒边缘和裂缝交代黄铁矿。集合体中粗粒磁铁矿变嵌晶很少包有钛铁矿包体。

在黄铜矿块体中罕见的硫化物和硫酸盐形成复杂的共生。（图2）通过比较它们的光学性质（包括光谱反射）进行了鑑定，这些性质已被莱姆道尔（1969）乌顿布格和伯克（1971）描述过。块硫锑铅矿的不规则斑包有自然铋的骸晶或交代硫锑铁矿的不规则体，或者和辉砷铜矿的集合体共生。块硫锑铅矿和硫锑铁矿同样产在定为片状结构的和薄片状硅酸盐呈纹条出现的纹条里。硫锑铅矿、辉砷铜矿和自然铋的伴生同样是罕见的。

硫黄铁矿富矿石具有硫化物和硅酸盐层条带并且具有绿泥石、透闪石和阳起石形成明显的片理。闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿通常在这些矿石中产出。用ARL—SEMQ显微探针（15Kv，电流0.1 μ a，计时10秒；纯Zn和Mn金属作标样）对这些集合体中的闪锌矿和铁的硫化物的电子探针分析显示：和黄铁矿、磁黄铁矿伴生的闪锌矿的FeS克分子含量在15.3%到17.6%之间，仅和黄铁矿伴生其含量在6.0%到7.5%之间变化（参看德伯1978）。和闪锌矿、黄铁矿共存的磁黄铁矿含有Fe原子47.7—48.0%指明这个相是六方磁黄铁矿 $Fe_{1-x}S$ 的固溶体。X—射线粉晶衍射分析用CuK α 辐射，当磁黄铁矿从一个样品分离出来就给出一个简单明显（尖锐）的102峰。可是在另一些样品中，在六方102位置的双峰指明了单斜十六方组合两个相的存在。（阿诺德1966）。当用磁性胶体探讨时（斯科特1974）这些样品展现出在六方主晶中单斜相的磁性范围的原状排列。结构关系例如单斜磁黄铁矿沿着颗粒边部，破碎带和六方磁黄铁矿的基部优先出现，表明单斜磁黄铁矿是蚀变矿物，或许代表磁黄铁矿组分中的逆向变化（参看斯科特等1977）。

变质矿石组构：

阿姆伯吉—德力矿石光片的一系列详细研究，用适当试剂浸蚀，展现出包括一些不常见组构的主要显微组构，这些不常见组构是变质作用引起的。其较重要的和有趣的特点描述如下。

多边形颗粒的花岗变晶状镶嵌结构在一些地方显极好的泡沫构造（图3、4、5）存在于闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和磁黄铁矿的块状或条带状矿石中。单个颗粒一般粒径0.1—0.3mm，

罕见的较粗颗粒长0.6mm产在黄铜矿块体中。黄铜矿和闪锌矿二者的颗粒在一些地方(图4)显示出粘着的退火双晶片、弯曲和形变。方铅矿和黄铜矿在闪锌矿块体中以细粒相出现的地方呈细束状、凹凸状或乳滴状,结状沿闪锌矿颗粒和二者和二者的介面或在等角三接点处出现(图3)。在矿石中垂直硅酸盐的片理的切片中黄铜矿的多边形显示出他们的长:宽的比率在2:1和1.7:1之间变动。这种颗粒的选择性、排列定位产生清楚的矿石片理。有趣的是在磁铁矿结构中在一些地方(图5)出现一些具有直移双晶片、扰曲和变形的粗颗粒。

黄铁矿矿石一般显糖粒状结构,这种结构共有三接点式角约 120° 标备的单一形式分布。这种特殊的磁铁矿颗粒主要地是含有园形到次园形方铅矿、闪锌矿、黄铜矿包体的变嵌晶,及较少含有磁铁矿颗粒和透闪石柱晶。包体排列常常是残缕的或雪球的,闪锌矿的颗粒、透闪石柱晶和黄铜矿的斑点在下方铅矿基质中发现了,这种方铅矿围绕旋转的黄铁矿变晶分布。(图6)黄铁矿的生长阶段由包体的港湾指明了:包体限制在仅沿或在平行于颗粒边缘的带中结合。在具有低的硫化物硅酸盐比值的切片中,拉长的黄铁矿颗粒平行于片理,其中有黄铜矿并且在压力影区方铅矿和闪锌矿不常浓集。在一定情况下,岩石中的透闪石柱晶(Se)决定的片理穿过内片理的拉长的黄铁矿晶粒(Si),证实黄铁矿晚期的生长(图7)。许多拉长的颗粒用稀 HNO_3 浸蚀出现粒状集合体,它们的生长已被先前的片理控制。然而在阿姆伯吉—德力矿石中某些扁平 and S—形单一黄铁矿颗粒似乎和格拉夫和斯科纳(1970)的观察是不相容的,他们认为在地壳内所有变形条件下黄铁矿具有脆性物质的性质。在自然界很缓慢应变速率(参看莎科和德伯1974)和或者高温及高分压条件下(艾肯逊1975)或许黄铁矿的可塑性变形是可能的。随着较松软的硫化物的裂隙闭合,黄铁矿同样已经遭受局部地塑性变形。在个别样品中,用 HNO_3 浸蚀,颗粒内部显出平行于黄铁矿颗粒界线的带,或不规则到椭圆形斑点,在整个颗粒中类似于残余胶体构造。在黄铜矿富矿石中显筛状构造並包含黄铜矿乳滴的粗粒磁铁矿变嵌晶是常见的。

在透闪石和绿泥石並包含黄铜矿、闪锌矿、磁铁矿、黄铁矿拉长颗粒的纹层状富矿石中发育有很好的定向结构。方铅矿薄膜和结状绿泥石片呈间层出现,围绕粗粒黄铁矿斑状变晶的是硫化物叶理和扰曲。这些硫化物叶理已经广泛地被记录並通过交错使之分裂,或者被分布在重结晶硫化物磁铁矿结构中的鳞片状和刀状硅酸盐的角页岩组构所破坏。硫化物中毒砂呈简单的和片状的生长双晶,该双晶在黄铁矿颗粒中呈放射状似玫瑰花状的斑点(图8)。

方铅矿单一颗粒中的变形由弯曲的解理或者在多个结晶方向上滑动带(图9)的存在所表明。在一些粗粒黄铜矿颗粒中平行于一边或者尖灭。纺锤形到凸透镜状的双晶在浸蚀光片上展现出来。

两个相当稀有的结构特征同样在阿姆伯吉—德力矿石中存在。 HI 浸蚀某些块状闪锌矿的光片反映出不连续的次园乳滴和不规则到椭圆形斑的存在,这种斑以宽度在0.003到0.16mm之间进行排列,並且主要被包含在闪锌矿的颗粒界面和退火双晶片之内(图3)。虽然光学上它们是很相似的,但它们与其基质比较略有不同。

用硫酸+稀盐酸浸蚀方铅矿揭示细粒不连续柱晶、针状和四方到长方板条(图10)在几乎所有的磨光片中存在,並类似于萨卡(1974)描述的东印度的萨吉彼里变质铅—锌矿。当少

数四方板晶横截面约为0.06mm时,占优势的柱晶之长度在0.09到0.3mm之间变化。柱晶统是不定向的,总体上它们在方铅矿基质上的分配是不规则的,仅管明显倾向群集于均粒界线附近(图11)。有趣的是,当在扫描电子显微镜下研究时柱晶和长方板晶被发现横切颗粒界限。

讨论:

对包含在多相变质岩石中的阿姆伯吉—德力矿变质组发展的认识在矿石和变质作用关系方面提出两种可能性:A)矿石经历了早期区域变质作用相和晚期热变质作用相或B)矿石只经历了晚期低压热变质作用。

通常硫化物—硅酸盐片理围绕旋转的黄铁矿变嵌晶呈流动状,黄铁矿眼球的压力影区的硫化物“尾”的纹理平行于岩石的片理,是在绿片岩相条件下岩石在区域变质作用期间的演化特征。

象在角页岩组中硅酸盐集合体和闪锌矿地质测压法基础上作出的那样,其后的岩石和矿石热变质作用相产生在大约3.4千巴/575°C的P—T条件下。阿姆伯吉—德力硫化物的特征的重结晶和角页岩结构与矿物生长的特点及在该相期间发育的二次重结晶作用一起清晰地迭加在先前存在的片岩组上。具有定向结构的早期变形的集合体重结晶作用的证据是在包含残余较粗颗粒重结晶的黄铜矿镶嵌结构中扁平的多边形颗粒和弯曲的直移双晶片的定向性。(图5)这一组结构的这一解释被斯坦顿和威列的实验研究所支持。

在矿石的完全重结晶性质的观察中对闪锌矿基质中不连续斑点和方铅矿基质中柱晶和板晶的存在是感兴趣的。闪锌矿中可比较的特征可能归于铁的高浓度已被巴顿、贝恩克和图明(1963)从密西西比各矿石中和被斯科特、巴恩斯(1971)从合成闪锌矿晶体中给以描述。电子显微探针分析检验了阿姆伯吉—德力闪锌矿的斑点和基质间任何组成不同的可能性。在一些光片中闪锌矿颗粒就Fe、Zn、Mn和Cd而论是均匀的,这些次团斑和主颗粒有相同的组成。在一些样品中Cd和Mn浓度在0.1%时是不易发现的。在观察中斑似乎说明是晚期角砾或者是在前退火的闪锌矿上次级纹理的发展。闪锌矿中没明确分解退火双晶带(图3)支持后者可能性。

方铅矿中柱晶和板晶明显地不是双晶片,特别类似于退火钢中的贝氏体和马氏体的构造。当贝氏体的形成包括元素的扩散(例如碳在钢中的情况)时,马氏体反应是一扩散较少的相转变,在这个转变中新相和原相的组分相同,但是伴随剪切变形新晶格产生了(谢乌蒙1969,史密斯1964)。倘若邻接的颗粒显示高度构造适应马氏体能横切颗粒界限。

柱晶和板晶中一定元素的不同浓度检验的可能性,用电子探针进行了多种形式的分析。在可察觉的分析限度内它们都是纯PbS。通过对柱晶和基质的不同元素的电子探针扫描,在明显的相和它们的主晶之间的化学成分上没有探测出任何不同。下面这些元素在指定的浓度标准是不易察觉的:Ag(0.5%),Fe(0.1%),Cu(0.1%),Bi(0.5%),As(1.0%),Sb(0.5%),Zn(0.1%)。

上面的资料排除这些柱晶是溶离作用片或贝氏体构造的可能,并且有利于萨卡的建议。(1974萨吉帕里矿),这些类似于马氏体,可是为了坚定这一点,对板状晶体和基质的结晶构造的详细研究是必要的。自从应用应力和基质的塑性变形对马氏体反应更了解了,柱晶或许

是在变形相(F_3)在矿石的退火和重结晶之后形成。这些柱晶的发育切穿方铅矿平衡颗粒的界限也支持这一可能性。加之,虽然马氏体的转变主要地倾向于是不透热的,即由于温度的突然变化,在某些合金中如Fe—Ni合金中等温系统被了解了(里德—希尔1966)。作者的意见象萨卡指出的(1974)等温形成可能是在不透热转变所需要的自然条件下变质矿物快速冷却问题的结果。

很多另外的变形特征的存在象黄铜矿中双晶片的变形、方铅矿中弯曲的解理和滑动带、黄铜矿中变形的退火双晶片等在完全重结晶的矿石中似乎有点不一致。根据一般的和惊人的低温的观察,在低温下退火能够去掉在柔软硫化物中早期变形特征的任何痕迹。(斯坦顿和果曼1968,吉尔1969,科拉克和科里1973),区域变质作用期间(F_1)形成的变形特征比热变质作用期间(F_2)矿石的普遍退火时间为长,这点看来与上相同,或者退火过程本身是不完全的和局部选择性的。因此前面提到的变形特征象闪锌矿中的次级纹理和方铅矿中的马氏体片在重结晶后弱变形幕(F_3)似乎完全有可能形成——这一幕在岩石中产生向斜槽,没有任何显著的重结晶作用。

热变质作用期间矿石中组分的变化是很小的。仅在一些样品中结构关系揭示或者通过去硫作用黄铁矿变成磁黄铁矿。在阿姆伯吉—德力矿的热变质作用期间大体上这一过程似乎是重要的。可是,矿物中组成的均匀性象Fe、Zn、Cd和Mn的闪锌矿(参考德伯1978)指明在均匀的压力下在Zn—Fe—S系中达到相平衡认为变质作用相已经完成。在镁质和钙镁质变质组合中黄铁矿和磁黄铁矿是和闪锌矿共存的最普遍的铁矿物。缓冲组合黄铁矿+磁黄铁矿+磁铁矿和组合磁黄铁矿+磁铁矿在德力的含铁的变质组合中二者和闪锌矿共存偶然被记录,并且是变质平衡时相继低的 fs_2 和 fo_2 值的指示。(参考德伯 1978)。

参考资料 略

译 自 Mineralium Deposita

Volume 14 Number1 1979

李 兆 龙 译

王 郁 校

图 2—11 为照片,见图版 I

图版 I

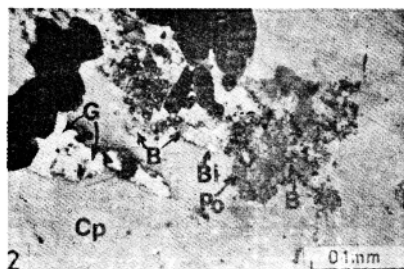


图2 黄铜矿(Cp)中罕见的硫化物和硫盐类的复杂共生。不规则块状硫锑铅矿(B)包括自然铋(Bi)的骸晶,交代硫锑铁矿(G)不规则斑,并且和磁黄铁矿(Po)伴生。

反光镜下,油浸下。

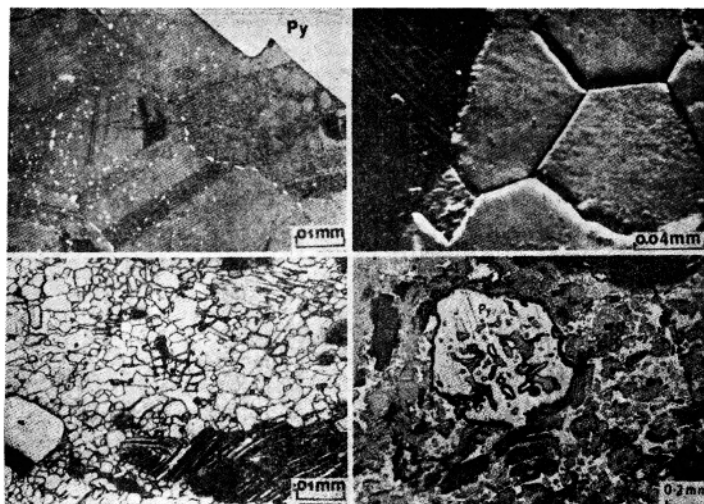


图3 细粒黄铜矿沿闪锌矿颗粒界面和退火双晶片分布。注意右方紧接黄铁矿(Py)的闪锌矿颗粒内的椭圆及圆形斑点。样品用H I 浸蚀。反光镜下,空气中。

图4 方铅矿镶嵌结构的扫描电子显微镜照片(反向散射电子, 20Kv)显示了“鳞状构造”, 这种构造是三个特殊的颗粒在一点上相遇并且在接合点上各形成120°角。注意左方闪锌矿的轻微弯曲退火双晶片。样品用硫脲+HCl浸蚀。

图5 黄铜矿的多晶质镶嵌结构。该矿物为产生清楚矿石片理的扁平颗粒。注意在下方右手角黄铜矿斑晶中直移双晶片。样品用铬酸铅溶蚀。反射光。分异干涉色差, 空气中。

图6 具有方铅矿和闪锌矿包体的黄铁矿园形变嵌晶。粒状闪锌矿和柱状透闪石(黑灰)在围绕变嵌晶的方铅矿基质上分布。反射光, 空气。

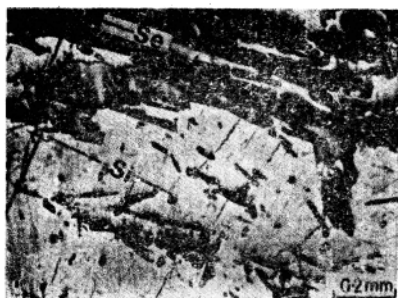


图7 在黄铁矿变嵌晶中近于平行的透闪石板柱描绘出一种内片理(Si), 这种内片理平行于在黄铜矿块体中以同样矿物描绘出的外片理(Se)。

反射光, 单偏光, 空气中。



图8 粗粒黄铁矿中渗砂的玫瑰花状斑点, 单个颗粒显片状双晶。

反射光, 正交, 油浸。

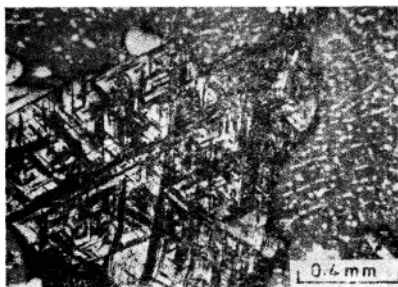


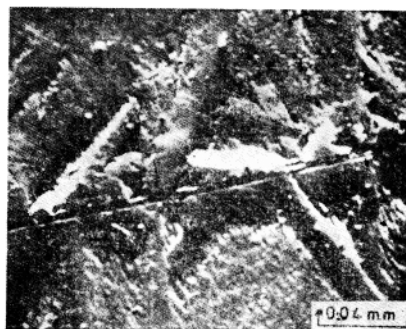
图9 沿方铅矿(Hk1)方向的滑动带。在毗邻的闪锌矿中拉长的黄铜矿乳滴沿结晶方向分布。用硫脲+HCl浸蚀。

反射光, 单偏光, 空气。



◇图10 方铅矿内不规则的磁铁矿柱晶，四方到长方形的晶体沿颗粒边部聚集。

用硫脲+HCl浸蚀。
反射光，单偏光，空气中。



◇图11 沿方铅矿颗粒边部聚集的方铅矿中不规则磁铁矿柱晶的扫描电子显微镜照片（反向散射电子20KV）

用硫脲+HCl浸蚀。

1977-1978

1978

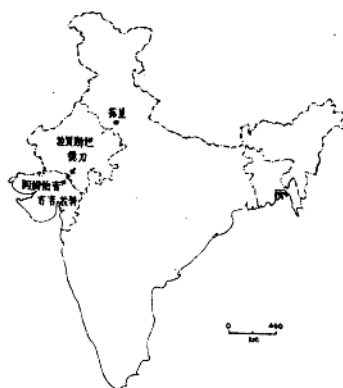


图 1: 阿姆伯吉—德里示意图。

