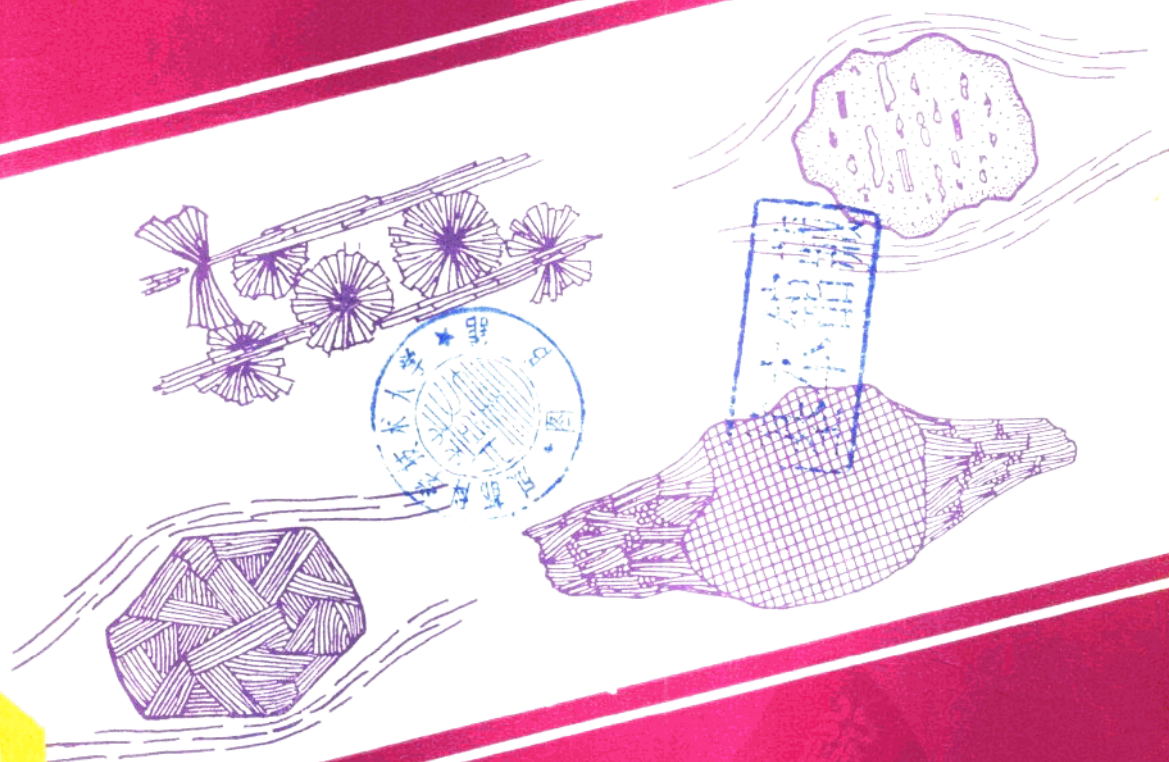


916606

高等学校教材

变质岩岩石学 实验指导书

陈曼云 刘喜山 编



地质出版社

高等学校教材

变质岩岩石学实验指导书

长春地质学院

陈曼云 刘喜山 编

地质出版社

※ ※ ※

本书由安三元主审，经地质矿产部岩石学课程教学指导委员会变质岩课程教学指导组于1989年3月主持召开的审稿会议审稿，同意作为高等学校教材出版。

※ ※ ※

高等学校教材
变质岩岩石学实验指导书

长春地质学院

陈曼云 刘喜山 编

责任编辑：赵俊磊

地质出版社 出版

（北京和平里）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店总店科技发行所发行

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：5.75 字数：129000

1990年5月北京第一版·1990年5月北京第一次印刷

印数：1—2470册 定价：1.25元

ISBN 7-116-00590-0/P·502

前 言

最近20年来,变质岩领域中的研究进展迅速,如对世界上最古老岩石、花岗岩-绿岩区和高级变质区的研究不断深入,变质作用与地质构造环境和地壳演化等方面的综合研究,都取得一批很有价值的新的科研成果。这些成果已在贺同兴、卢良兆、李树勋和兰玉琦等教授编写的《变质岩岩石学》教材中充分反映。

本变质岩岩石学实验指导书是以陈曼云副教授于(1981、1985)编写的《变质岩实习指导书》为基础,并结合教学实践,经调整、扩充而成,作为《变质岩岩石学》统编教材的配套教材。

本指导书中所述的主要变质矿物、变质岩矿物之间关系的观察、变晶作用与变形作用的关系、矿物共生图解的编制、矿物成分分析数据的处理及共生矿物对平衡温度-压力数值的计算方法等内容,除了能较好地满足教学需要外,也可供从事变质岩地区研究的科技工作者参考。

全书共分二章,第一章和第二章的一、二节由陈曼云编写,第二章的三节及附录由刘喜山编写。

贺同兴、李树勋、卢良兆教授和周裕文副教授审阅了文稿,并提出了宝贵的意见;在提纲讨论中,王天武工程师给予了热情帮助;承地质矿产部岩石学课程教学指导委员会变质岩课程教学指导组的各兄弟院校的教授和老师参加评审,对文稿提出了很有启迪和中肯的意见;安三元教授主审全书。值此本书出版之际,谨向他们表示深切的谢意。

限于编者的水平,书中不当和错误之处,敬请读者赐教。

编 者

1989年7月

目 录

第一章 变质岩岩石鉴定	(1)
第一节 变质岩矿物成分的研究	(1)
一、主要变质矿物	(1)
二、矿物的鉴定	(16)
第二节 变质岩结构构造的观察	(20)
一、变余结构的观察	(20)
二、交代结构的观察	(21)
三、变晶结构的观察	(22)
四、显微碎裂-变形结构的观察	(23)
五、相似结构构造的鉴别	(25)
第三节 变质岩的鉴定	(27)
一、变质岩的一般定名原则	(27)
二、主要变质岩岩石类型	(29)
三、变质岩鉴定报告的要求	(29)
四、变质岩描述实例	(39)
五、不同原岩系列变质岩在递变变质作用中的变化规律	(41)
六、鉴定变质岩应注意的问题	(45)
第二章 变质岩的成因研究	(47)
第一节 矿物共生关系的研究	(47)
一、变质矿物平衡共生组合的判别	(47)
二、变质矿物之间的反应关系	(48)
三、变质矿物的包裹关系	(51)
第二节 变形作用与变晶作用关系的研究	(51)
一、构造前变晶作用	(52)
二、同构造期变晶作用	(52)
三、构造期后变晶作用	(53)
四、多期叠加组构的研究	(55)
第三节 矿物共生图解及矿物化学成分的研究方法	(55)
一、矿物共生图解及其有关参数值计算	(56)
二、矿物共生图解的编制	(66)
三、变质矿物成分分析数据的处理及应用	(68)
附录一 变质岩实验教学安排	(76)
第一阶段 变质岩岩石学实验	(76)
一、岩相学观测教学阶段	(76)
二、常见岩石类型的观测	(76)
第二阶段 变质岩成因研究	(77)

一、岩石成因标志观测技能训练	(77)
二、课堂设计	(78)
附录二 课外计算和作图题	(80)
附录三 变质级与变质相、变质带对应表	(82)
附录四 常用偏光显微镜测定矿物粒度大小换算值表	(83)
附录五 主要氧化物分子量表	(83)
附录六 矿物名称缩写对照表	(84)
参考文献	(85)

第一章 变质岩岩石鉴定

准确鉴定变质岩石是本课程最主要的任务之一。变质岩是各种不同成分的原岩经受不同程度变质和构造形变作用改造的产物，因而它较沉积岩、岩浆岩更为复杂，鉴定的难度也相对较大。

在鉴定变质岩时，应注意如下两个关联的方面。首先，应考虑原岩化学成分和成因类型的影响，化学成分相似的原岩，在不同变质条件下可形成各种不同的变质岩。在鉴定时，要注意总结它们在矿物成分、矿物共生组合、岩石结构构造的特征及其在不同变质条件下的变化规律。其次，需注意变质、变形作用的改造，尤其是与变质岩成因有关的矿物之间关系的观察，这两方面是鉴定和研究变质岩的基础。

变质岩的鉴定过程可归纳为：描述岩石的主要矿物成分和含量，要特别注意数量虽少但有特殊意义的特征变质矿物；观察描述岩石的结构构造，应特别加强能反映变质岩成因的有关矿物之间相互关系的结构的观察和描述；根据各类岩石的定名原则进行定名，命名时要注意与其相似岩石的区别；综合观察和描述结果，讨论变质作用条件，分析可能的原岩成分。需要特别指出的是，对变质岩产出的地质环境的了解，是正确鉴定变质岩的前提。

第一节 变质岩矿物成分的研究

变质岩的矿物成分，是认识和鉴定变质岩的基础之一。在没有交代作用条件下，变质岩的矿物成分既决定于原岩的总化学成分，也受变质作用物化条件控制。研究变质岩矿物成分的目的，除了正确鉴定岩石和分类命名以外，也可通过矿物成分了解变质作用的物化条件，划分变质带、变质相和变质相系。此外，变质岩的矿物可提供研究变质作用演化历史和恢复原岩的重要信息。

在鉴定变质矿物时，要求掌握如下内容：

- (1) 手标本和显微镜下矿物的主要特征；
- (2) 矿物的主要化学成分；
- (3) 矿物的可能变化产物；
- (4) 相似矿物间的区别；
- (5) 矿物的形成条件和地质产状；
- (6) 学会鉴定矿物的方法、步骤，熟练利用工具书正确鉴定矿物。

一、主要变质矿物

1. 蓝晶石 (kyanite)



三斜晶系

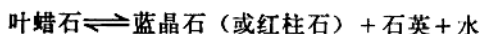
浅蓝色，风化后呈灰白色长柱状或长板状，解理{100}完全、{010}中等。硬度因方向

而异,在解理最发育的{100}晶面上平行晶体延长方向为4.5(小于小刀),垂直晶体延长方向则为6(大于小刀)。上述特征是肉眼鉴别蓝晶石的重要标志。

显微镜下 无色,正高突起,在垂直C轴切面上可见二组解理,解理夹角为 74° ,大于角闪石而小于辉石的解理夹角,该切面上解理细而直的为{100}解理,稍粗的为{010}解理。不象辉石和角闪石的横切面那样为对称消光,蓝晶石的横断面呈斜消光。最高干涉色在I级橙黄—红色。在垂直锐角等分线的切面上,可测得最大消光角 $C\wedge Ng=30^\circ$,该切面的特征是I级灰白干涉色,有一组断续的解理。要测得真正的消光角,必须用锥光检查是垂直锐角等分线切面,才能在该切面上测定 $C\wedge Ng$ 的消光角,除此以外,其它平行C轴切面的消光角在 $0^\circ-30^\circ$ 之间,在解理很发育的柱状切面,一般消光角都较小。经常具有简单或聚片双晶,(+)延性。二轴晶,(-)光性,光轴角较大。

蓝晶石可转变为绢云母、白云母或叶蜡石。它与硬绿泥石最简便的鉴别方法是蓝晶石为(+)延性,而后者为(-)延性。

形成条件和地质产状 由于蓝晶石的成分为 Al_2SiO_5 ,所以它的原岩多是含 Al_2O_3 较高的岩石,如粘土岩、部分中酸性火山碎屑岩及含泥质较多的砂岩和粉砂岩。蓝晶石是中压相系的标志矿物,以中温中压条件下最常见。在高温高压条件下, Al_2SiO_5 稳定的矿物不是夕线石,而是蓝晶石,可由高压的榴辉岩中含有蓝晶石而证实之。据实验资料,蓝晶石可由叶蜡石转变而成,其变质反应为:



反应温度在 $400-430^\circ\text{C}$,压力在 $0.1-0.4\text{GPa}$ 。当温度大于 620°C ,压力在 0.55GPa 时,蓝晶石不稳定,转变为夕线石;在中温条件下,压力下降,蓝晶石可转变为红柱石。

蓝晶石经常与石榴子石、十字石、黑云母、白云母等矿物共生产出在云母片岩中;有时也与天蓝石、蓝线石、石英等矿物相伴生,在有的榴辉岩和富铝片麻岩中也有蓝晶石产出。

2. 红柱石 (andalusite)



斜方晶系

浅红色,风化后呈灰白色或黑灰色,柱状晶体,集合体呈放射状,平行{110}解理完全。

显微镜下 无色,有时呈粉红色、浅绿色多色性,颜色的分布往往不均匀,有深有浅,经常集中在晶体中部;突起中等。柱状切面有一组平行柱面的解理,干涉色I级橙黄,平行消光,由于薄片中经常是任意的斜切面,所以斜消光现象较常见,(-)延性。垂直C轴近方形切面上,具二组近正交的完全解理,该切面干涉色呈I级灰色,对称消光;在锥光下呈垂直锐角等分线的干涉图,二轴晶,(-)光性。

在红柱石晶体中常含有炭质包裹体,在横断面中呈对角线十字形分布;在纵切面中沿延长方向呈带状分布,这种含炭质包裹体的红柱石变种,称为空晶石。

形成条件和地质产状 红柱石的次生蚀变产物也是绢云母、白云母或叶蜡石。红柱石与紫苏辉石十分相似,区别两者的最简便方法是测定延性, (+)延性的是紫苏辉石, (-)延性的是红柱石。

红柱石的化学成分与蓝晶石相同,其原岩成分与蓝晶石的相似。红柱石经常产于中温低压的变质条件,当温度升高到 620°C 以上时,红柱石不稳定向夕线石转变,在中温条件

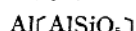
下, 压力增加, 红柱石转变为蓝晶石。据 A. Hirschberg 和 H. G. F. Winkler (1968) 的实验研究, 红柱石还可通过下列变质反应形成:

绿泥石 + 白云母 + 石英 $\rightleftharpoons$ 堇青石 + 红柱石 (夕线石) + 黑云母 + 石英
变质反应的温度为 515—555℃, 压力为 0.1—0.4 GPa。

红柱石经常与堇青石、黑云母、白云母、石英、长石等矿物共生, 形成于中温低压条件。当压力在中—低压过渡型时, 红柱石可与十字石、堇青石等矿物共生。总的来看, 红柱石多形成在接触变质作用或低压区域变质作用的云母角岩或云母片岩中, 在次生石英岩中也有红柱石产出。

空晶石经常产于低级接触变质岩石中。

3. 夕线石 (sillimanite)

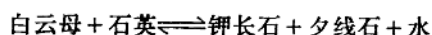


斜方晶系

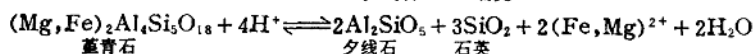
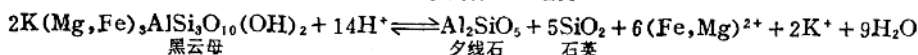
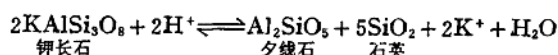
浅黄色, 浅褐色, 风化面灰白色。个体较大者呈细长柱状、针状, 但多为纤维状或毛发状集合体。{010}解理完全, 在柱状晶面上可见到纵纹。

显微镜下 无色, 但毛发状、纤维状集合体呈浅褐色, 中高突起。(010)柱状切面不具解理, 经常有平行(001)似竹节状或手指状裂开。该切面呈最高干涉色, 达 I 级紫红—II 级蓝绿, (+) 延性。横切面近方形, 有一组对角线解理, 这是夕线石较典型的特征。该切面具 I 级灰干涉色, 锥光下呈垂直锐角等分线的干涉图, 二轴晶, (+) 光性, 2V 较小, 在 20°—30° 左右。

形成条件和地质产状 夕线石与蓝晶石、红柱石的化学成分一致, 原岩成分也与它们的相似。形成夕线石的途径很多, 它可由红柱石和蓝晶石在温度升高条件下转变而成, 也可由白云母转变而成, 其变质反应为:



夕线石还可由云母类、长石类和堇青石等含铝较高的矿物经离子交换反应而形成, 如



上述变质反应是氢离子置换作用的结果, 从低—高温均可通过上述变质反应形成夕线石, 其成因与岩浆作用、热液作用、形变作用和混合岩化作用密切相关。因而, 不能把夕线石简单地认为是高级变质的标志矿物, 应根据其地质产状和矿物之间的关系等具体分析其形成环境。

夕线石多分布于区域变质低—中压变质相系的中高级变质的云母片岩、片麻岩和麻粒岩中, 它也常产于在接触变质的云母角岩中。在中级变质时, 它常与黑云母、白云母、十字石、堇青石、石榴子石等矿物共生, 而在高级变质岩石中, 夕线石经常与钾长石、黑云母、堇青石、石榴子石、石英等矿物共生, 形成高级变质的富铝片麻岩。当夕线石与紫苏辉石共生时, 则属于麻粒岩相的富铝麻粒岩类。

4. 十字石 (staurolite)

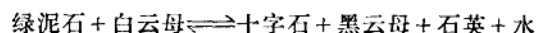


斜方晶系

褐色，短柱状，{010}解理不完全，经常具有正交或斜交双晶。

显微镜下 具金黄色—浅黄色多色性，柱面平行下偏光时色最深。正高突起。柱状切面平行消光，(+)延性，最高干涉色为Ⅰ级橙黄。横切面呈菱形或六边形，对称消光，该切面可获得垂直锐角等分线的干涉图，二轴晶、(+)光性，2V较大。十字石经常具有十字状贯穿双晶。晶体中常含有石英等矿物包体构成筛状变晶结构，当这些包体定向排列时，则形成残缕结构。

形成条件和地质产状 十字石是含铁的铝硅酸盐矿物，它可由硬绿泥石、绿泥石、白云母和石英等矿物经变质反应而形成。H. G. F. Winkler(1976)将以下变质反应作为变质泥质岩石进入中级变质的临界反应：



变质反应的温度在540—565℃，压力在0.4—0.7GPa，十字石+石英这一组合大致稳定在500—700℃，压力范围较宽。当温度升高时，十字石开始不稳定，并转变成夕线石、石榴子石等矿物。十字石是变质泥质岩石进入中级变质的标志矿物。

十字石经常与黑云母、白云母、蓝晶石、石榴子石、石英和长石共生，是中温中压条件下典型的矿物组合，在较少情况下，十字石与红柱石、堇青石共生产出，反映其形成于中温，中—低压条件。

5. 堇青石 (cordierite)



斜方晶系

无色，大多为粒状及不规则状，但有时呈自形的短柱状，横断面为六方形。{010}解理不完全，其特征与石英十分相似，但在风化面上，由于堇青石容易分解形成绢云母和蛇纹石而形成粒状小凹坑，可作为手标本鉴定堇青石的标志。

显微镜下 无色，正低突起，有时亦有负低突起，经常为不规则粒状，当晶形较好时，多呈六边形和短柱状。最高干涉色为Ⅰ级黄白，比石英和长石高一个色序，平行解理方向平行消光，(-)延性。堇青石有六连晶和三连晶，六连晶的相邻单体呈对称消光，双晶的相对单体为对顶消光，相邻双晶之间的夹角为60°，三连晶的相邻双晶夹角为120°，堇青石经常具有与斜长石十分相似的聚片双晶，有的一个晶体中有二组斜交的聚片双晶，二组双晶的夹角经常是120°或60°。在堇青石中细小的锆石（独居石、磷灰石、金红石）包体周围，经常见到很特殊的柠檬黄的多色晕，这是鉴别堇青石的主要特征之一。二轴晶，大多是(-)光性，有时为(+)光性，2V变化较大。

堇青石的次生变化也是鉴别它的特征之一。沿着堇青石的边缘、解理和裂缝经常有细小绢云母呈眼睫毛状分布，有时被绢云母或浅黄色（有的稍带绿的色调）的胶蛇纹石部分或全部置换而呈假像，胶蛇纹石在正交偏光下几乎不显光性。

堇青石与石英、斜长石等矿物十分相似，它与石英区别在于：①有解理；②有次生蚀变产物绢云母和胶蛇纹石；③存在双晶；④在锆石等包体周围有柠檬黄多色晕；⑤如以上特征不明显时，则可以其二轴晶、(-)光性与石英相区别。与斜长石区别为：①在锆石等包体矿物周围，堇青石具柠檬黄多色晕；②具三连晶或六连晶；③二组聚片双晶斜交，其交角经常是120°或60°；④堇青石仅有一组不完全解理；⑤平行解理方向为平行消光，(-)延性；⑥有浅黄褐色的胶蛇纹石化。

形成条件和地质产状 堇青石是铁镁铝硅酸盐矿物。H. G. F. Winkler(1976)认为，

在变泥质岩石中,首次出现堇青石可作为进入中级变质(相当于低角闪岩相)的标志矿物。堇青石形成在中—高温、低压条件。它常与红柱石、白云母、黑云母、石英和长石等矿物共生产于中温低压的各种云母片岩和云母角岩中;也可以与钾长石、夕线石、石榴子石、黑云母、石英或偶而与紫苏辉石等矿物共生,形成各种高级变质的片麻岩或麻粒岩。堇青石很少与蓝晶石共生产出,而它与十字石和红柱石共生是低—中压相系过渡类型的标志。

6. 硬绿泥石 (chloritoid)



单斜晶系

呈暗绿色,晶体为板状,集合体呈束状、放射状,断面呈六边形及菱形,解理平行{001}完全,硬度5—6,接近或稍大于小刀。

显微镜下 绿色,黄绿色或灰蓝色,正高突起,晶体中常有石英、炭质等包体呈有规律排列,形成砂钟构造。纵切面呈板条状,一组完全解理,最高干涉色I级橙红,斜消光,消光角 $\alpha \wedge Np = 3^\circ - 30^\circ$,(-)延性。硬绿泥石经常具有简单双晶或聚片双晶。横断面六边形或菱形,干涉色呈I级暗灰,该切面无解理。锥光下可获得垂直锐角等分线的干涉图,二轴晶,(+)光性,2V在 $36^\circ - 60^\circ$ 。

形成条件和地质产状 硬绿泥石是含铁的铝硅酸盐矿物。它是典型的低温矿物,稳定在低—高压范围内。它可由叶蜡石、富铁绿泥石、钠云母等矿物经变质反应而形成,在温度升高条件下,硬绿泥石经变质反应形成十字石、石榴子石和堇青石,因此,H. G. F. Winkler(1976)将硬绿泥石作为变质泥质岩石进入到中级变质的负标志(即在中级变质岩石中不含有硬绿泥石)。

总的来看,硬绿泥石是低级变质(绿片岩相)的标志矿物。它经常与绿泥石、白云母、黑云母、石英、长石等矿物共生,形成含有硬绿泥石的片岩。它常产于含FeO和 Al_2O_3 较高的变泥质岩石和部分中酸性火山碎屑岩中,在低、中和高压相系及接触变质岩石中,都有硬绿泥石产出。

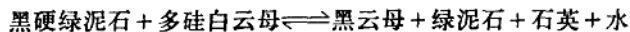
7. 黑硬绿泥石 (stilpnomelane)



单斜晶系

呈暗褐色,片状,集合体呈束状和放射状。在显微镜下,黑硬绿泥石与黑云母十分相似,区别在于:①黑硬绿泥石经常呈杆状,束状集合体;②黑硬绿泥石的{001}解理不如黑云母那样细而密,而垂直{001}解理的另一组{010}解理是黑云母所没有的;③黑硬绿泥石的突起比黑云母高,为中—高突起。

形成条件和地质产状 黑硬绿泥石常见于很低变质级的镁铁质岩石和具有特殊成分的变质沉积岩中,在变泥质岩石中,下列变质反应导致黑硬绿泥石的消失:



据K. H. Nitsch(1970)实验资料,该变质反应的温度在 $445 - 460^\circ\text{C}$,压力在 $0.4 - 0.7\text{GPa}$ 。这一变质反应相当于Barrow带中黑云母带的临界反应。进入黑云母带的标志是:黑硬绿泥石+白云母^①消失,代之以黑云母+白云母^②的出现,这说明黑硬绿泥石只稳定于很低变质和低级变质的低温部位(即相当于Barrow带的绿泥石带)中。黑硬绿泥石产出在

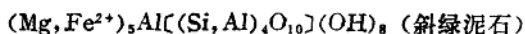
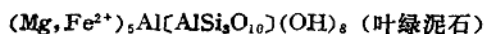
① 其成分接近绢云母。

② 其成分接近标准白云母。

较宽的压力范围内。

8. 绿泥石类 (chlorite group)

变质岩中常见两种绿泥石，即叶绿泥石和斜绿泥石，它们的化学分子式分别是：



单斜晶系

绿色，暗绿色，片状，鳞片状集合体，解理平行{001}极完全，硬度小。

显微镜下 绿泥石呈不同程度的绿色，正低突起，片状，一组解理完全。绿泥石具有两种形状的切面，一种切面正交或斜交{001}解理，呈长条状，具明显的绿—浅黄色多色性和一组完全解理；另一种切面与{001}平行，绿色，多色性不明显，无解理，在该切面上可获得垂直锐角等分线的干涉图， $2V$ 一般较小。

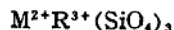
叶绿泥石和斜绿泥石的区别：①叶绿泥石呈异常干涉色——靛蓝色、锈褐色和紫丁香色，而斜绿泥石多呈Ⅰ级灰—黄色，由于本身绿色的重叠，使其常呈绿灰、绿黄灰等干涉色；②叶绿泥石以(+)延性为主，如出现(-)延性的叶绿泥，则反映其化学成分中Mg的含量较高，而所有的斜绿泥石均为(-)延性；③叶绿泥石为平行消光，而斜绿泥石总是有一小的消光角；④大多数叶绿泥石在解理方向平行下偏光时(Ng')色最深，而斜绿泥石在解理方向平行下偏光时(Np')色最深；⑤斜绿泥石经常可见聚片双晶；⑥叶绿泥石经常为(-)光性，含镁较高者为(+)光性；斜绿泥石为(+)光性。

形成条件和地质产状 绿泥石是铁镁铝硅酸盐矿物，它主要产于镁铁质系列的低级变质和很低变质岩石中，在富铝系列和长英质系列的变质岩石中，亦有少量绿泥石产出。在很低变质的岩石中，绿泥石经常与葡萄石、绿帘石、蓝闪石、硬柱石、硬玉等矿物共生，在低变质级岩石中绿泥石经常和绿帘石、阳起石、钠长石等矿物共生产出在绿片岩中。在千枚岩和云母片岩中也经常有绿泥石与绢云母或白云母、黑云母、硬绿泥石等矿物共生。由此可见，绿泥石(富铁)是低级变质的标志矿物，但实验资料证实，富镁成分的绿泥石在有流体存在时，温度高达800℃左右仍是稳定的。

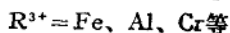
在富铝系列岩石中，中级变质时，富铁绿泥石不稳定，而与白云母、石英等矿物经变质反应形成十字石、堇青石、石榴子石和铝硅酸盐矿物(如红柱石、蓝晶石和夕线石等)。

有些铁镁矿物如辉石、角闪石、黑云母等经退化变质或气液变质后常转变为绿泥石，绿泥石也是一种十分常见的热液蚀变矿物，常与阳起石、绿帘石等矿物共生。

9. 石榴子石 (garnet)



等轴晶系



石榴子石按成分可分为两个类质同像系列：

铝质石榴子石——铁铝榴石、镁铝榴石、锰铝榴石

钙质石榴子石——钙铝榴石、钙铁榴石、钙铬榴石

同一系列石榴子石可以有连续类质同像置换，而不同系列石榴子石之间只能发生有限的类质同像置换。

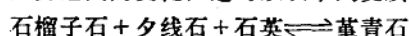
石榴子石颜色变化较大，常呈红褐色、玫瑰红、黄绿及黑色，自形的石榴子石常呈菱

形十二面体、四角三八面体或上述两者的聚形，晶形不好的石榴子石常呈粒状，有时呈粒状集合体。断口为油脂光泽，无解理，硬度大。

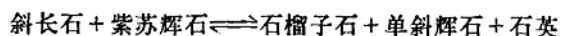
显微镜下 总有淡淡的红褐色，正高突起，自形晶体呈六边形及菱形，它形晶体常是粒状。无解理，具裂纹，通常为均质体，全消光。钙质石榴子石常具有光性异常现象，可见到Ⅰ级灰白干涉色，锥状双晶和由不同干涉色交替组成的同心环带状构造，二轴晶， $2V$ 一般较小。这种钙质石榴子石多产于大理岩和矽卡岩中。由于天然石榴子石经常以某种端元组分为主，还混溶有其它端元成分，所以要在薄片定出石榴子石的种属是较难的。

形成条件和地质产状 石榴子石是一种分布十分广泛的变质矿物，在各种不同的原岩系列及不同变质程度的岩石中都可存在石榴子石。

在高级变质的富铝片麻岩中，经常见到堇青石围绕石榴子石分布，这种变质反应关系反映了它们形成时温度和压力之间的变化，这可以从下列变质反应式中看到：

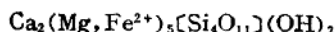


这一反应的温度在 $700-825^{\circ}\text{C}$ ，压力在 $0.2-0.4\text{GPa}$ 。在麻粒岩相条件下，如果看到下列变质反应：



(该变质反应的温度 $>700^{\circ}\text{C}$ ，压力在 $0.8-1\text{GPa}$)，即相当于高压麻粒岩相的变质程度。总的来看，铁铝榴石出现的频率和数量有随着压力增加而增加的趋势。

10. 阳起石 (actinolite)



单斜晶系

浅绿色、暗绿色，长柱状、针状，集合体为放射状，其它物理特征与角闪石十分相似。

显微镜下 浅绿色一无色的多色性，正中突起，横断面具角闪石式解理。最高干涉色在Ⅰ级顶部—Ⅱ级中部，斜消光， $C \wedge Ng = 10^{\circ}-20^{\circ}$ ，(+)延性，有时有双晶。二轴晶，(-)光性， $2V$ 较大。

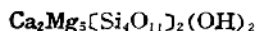
阳起石可转变为绿泥石、蛇纹石、滑石和碳酸盐矿物等。

阳起石与普通角闪石十分相似，一般情况下，浅绿色且消光角较小的“角闪石”有可能是阳起石，而呈褐色者则绝不会是阳起石。只有用化学分析、电子探针等方法才能精确测定角闪石类的成分。

形成条件和地质产状 阳起石属于钙质角闪石，它可由普通角闪石、辉石等矿物经退化变质转变而成，经常见到在辉石等矿物边缘有浅绿色阳起石围生，或阳起石呈辉石、角闪石等矿物的假像产出。在绿片岩相中，阳起石的稳定范围较绿泥石和绿帘石更窄些，阳起石的形成除受一定的温度和压力影响外，还取决于 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 P_{CO_2} ，当流体压力增大时，在较高温度下才能形成阳起石。当温度在 $480-500^{\circ}\text{C}$ 之间，阳起石开始不稳定，并转变为普通角闪石，这也是变质基性岩的高绿片岩相和低绿片岩相的分界标志矿物之一。

阳起石是典型的低温变质矿物，它经常与绿泥石、绿帘石和钠长石共生，组成典型绿片岩相的矿物组合，它也可以与绿纤石、葡萄石、蓝闪石和硬柱石共生，形成各种很低变质级的岩石。在气液变质作用中，阳起石也是一种十分常见的热液蚀变矿物。

11. 透闪石 (tremolite)



单斜晶系

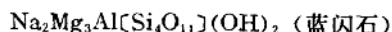
白色或浅灰色，晶体呈长柱状、针状，集合体为放射状、纤维状。

显微镜下 无色，其它特征与角闪石类矿物一致。

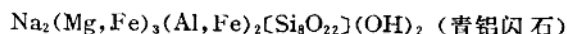
形成条件和地质产状 透闪石是钙镁硅酸盐矿物，它可由滑石和方解石、白云石和石英经变质反应而形成。透闪石稳定在绿片岩相的高温部位，在角闪岩相中也存在。温度增高，透闪石不稳定，转变为透辉石和镁橄榄石。

透闪石主要分布于变质硅质白云质灰岩中，经常与方解石、白云石共生，形成透闪石大理岩，有时也可与透辉石、镁橄榄石、金云母等矿物共生。透闪石也是变质钙硅酸盐岩石的常见矿物之一，此外，白云质胶结的石英砂岩经变质后，也能形成透闪石石英岩。

12. 蓝闪石和青铝闪石 (glaucophane和crossite)



单斜晶系



蓝闪石和青铝闪石以其颜色呈暗蓝色与其它角闪石相区别。

显微镜下 蓝闪石颜色十分特殊， N_g —天蓝色， N_m —紫色， N_p —浅黄色。干涉色 I 级，常因其本身颜色的影响而不易判别。消光角 $C \wedge Ng = 4^\circ - 14^\circ$ ，(+) 延性，二轴晶，(-) 光性， $2V$ 较小。其它特征与角闪石类矿物相似。

当蓝闪石类的化学成分中 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}} = 0.3 - 0.69$ 时，则为青铝闪石，其光性特征与蓝闪石十分相似，两者可从光性方位加以区别。蓝闪石的柱面方向为 N_g ，而青铝闪石为 N_m ；因而蓝闪石一定是 (+) 延性，而青铝闪石的延性可 (+)、可 (-)；青铝闪石的多色性是 N_g —紫色， N_m —天蓝色， N_p —浅黄色；最后可用垂直锐角等分线的干涉图（由紫色和蓝色组成的柱面）来区别两者（图1），如光性方位图为 (A) 时，属蓝闪石，如为 (B) 时，则属青铝闪石。



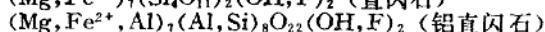
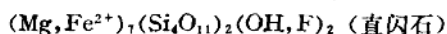
图 1 蓝闪石和青铝闪石的光性方位

A—蓝闪石平行 (100) 切面；B—青铝闪石平行 (100) 切面

形成条件和地质产状 蓝闪石和青铝闪石是高压低温条件下的标志矿物。它们分布较局限，主要产于蓝闪石—硬柱石相中，与硬柱石、硬玉、绿帘石、钠长石、霞石、绿泥石、绿帘石、黑硬绿泥石等矿物共生，形成各种蓝片岩，它们也可产于绿片岩相中，但在岩石中缺失硬玉、硬柱石和霞石等低温高压的矿物。

玄武质岩石经热液蚀变亦可形成蓝闪石，这种蓝闪石不具有指示高压低温的变质条件，因此，不应把蓝闪石看成只有一种成因。

13. 直闪石和铝直闪石 (anthophyllite and gedrite)



斜方晶系

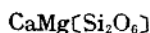
呈白灰、绿、褐等色，多呈柱状、针状，有时呈纤维状，其它特征与角闪石类相似。

显微镜下 直闪石多呈无色，铝直闪石具浅褐或浅黄绿色多色性，含铁较高的铝直闪石多色性明显。正中高突起，干涉色Ⅰ级橙—Ⅱ级绿（随含铁量增加，干涉色相应增高），纵切面平行消光，（+）延性。二轴晶，富镁的斜方角闪石为（-）光性，而富铁的斜方角闪石为（+）光性， $2V$ 较大。其它特征与角闪石类相似。

斜方闪石易蚀变为蛇纹石和滑石，与单斜角闪石区别在于纵切面为平行消光，色较浅；与斜方辉石区别在于斜方辉石突起稍高，在横断面上具有辉石式解理。

形成条件和地质产状 直闪石类主要形成在中—高级变质条件下。直闪石主要产于富镁的变质岩中，常与含镁较高的镁橄榄石、镁铁闪石、透辉石、金云母等矿物共生。铝直闪石主要产出在含镁较高的特殊成分的泥质岩石中，经常与堇青石等矿物共生。

14. 透辉石 (diopside)



单斜晶系

白色、浅绿色，柱状或短柱状，它形粒状也常见，集合体呈粒状和放射状。其它特征与辉石类矿物相似。

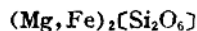
显微镜下 无色，自形透辉石的横断面近于方形的八边形，其中四个边明显地大于另四个边。 $C \wedge Ng = 38^\circ - 48^\circ$ ，其它光性特征与辉石类矿物相似。

透辉石易变化为绿泥石、阳起石、蛇纹石、滑石和碳酸盐矿物。

透辉石和普通辉石是变质岩中最常见的钙质辉石。自形晶体的横断面形状（透辉石近四边形，而普通辉石为八边形）是区别两者的特征之一，但在一般变质岩中，自形的辉石晶形较少见，单凭光性特征难以区别，这时可笼统地称为单斜辉石，精确的区分只能依靠其它分析方法。

形成条件和地质产状 透辉石是钙镁硅酸盐矿物，它主要产于各类大理岩，钙硅酸盐岩、矽卡岩和变质基性岩中。透辉石可由透闪石和方解石或白云石和石英经变质反应而形成。透辉石开始出现在低角闪岩相，可持续到高温的麻粒岩相。当原岩中 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值较高时，在较低温度条件下也能形成透辉石。透辉石经常与角闪石、斜长石、石榴子石等矿物共生，形成辉石斜长角闪岩和斜长辉石岩。在麻粒岩相变质条件下，透辉石与紫苏辉石、斜长石、石榴子石、有时还有角闪石和黑云母共生，形成各种麻粒岩。在矽卡岩中，透辉石是主要矿物之一。

15. 紫苏辉石 (hypersthene)



斜方晶系

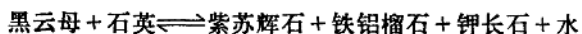
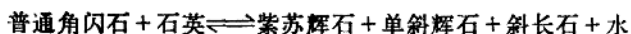
暗茶褐色，绿黑色，其它物理性质与一般辉石相似。

显微镜下 晶形、解理、突起等特征与辉石类矿物相似。它与单斜辉石的区别：①紫苏辉石具有多色性， Ng —浅绿色， Nm —浅黄色， Np —浅红色；②干涉色为Ⅰ级橙黄—红；③平行消光；④（-）光性。

紫苏辉石的光学性质与红柱石十分相似，测定延性符号是区别两者最简便的方法，（+）延性是紫苏辉石，（-）延性为红柱石。

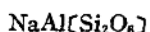
在变质岩中，有的紫苏辉石呈斜消光现象 $C \wedge Ng$ 可达 $7^{\circ}-8^{\circ}$ ，甚至达 10° ，很多学者认为这种斜消光的产生可能是因为紫苏辉石与单斜辉石呈隐晶条纹连生之故，它不属于斜紫苏辉石，而斜紫苏辉石主要存在于陨石中。

形成条件和地质产状 紫苏辉石可由普通角闪石或黑云母经高温变质反应而形成，其变质反应如下：



上述变质反应的温度大于 700°C 。通常把紫苏辉石首次出现作为进入麻粒岩相的标志矿物。紫苏辉石经常与长石、单斜辉石、石榴子石、有时和普通角闪石和黑云母等矿物共生，形成各种麻粒岩，在富铝系列变质岩中，紫苏辉石与夕线石（或蓝晶石）、堇青石、钾长石、石榴子石和黑云母共生形成富铝麻粒岩。

16. 硬玉 (jadeite)



单斜晶系

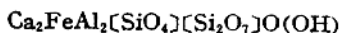
无色、白色、浅绿色，单个柱状晶体少见，多为粒状、毡状集合体，呈致密块状。

显微镜下 大多呈无色，中高突起，干涉色Ⅰ级黄白—Ⅱ级中部，具简单或聚片双晶，消光角 $C \wedge Ng = 33^{\circ}-35^{\circ}$ ，其它光性特征与辉石类矿物相似。

硬玉与其它辉石的区别是：硬玉的折光率较其它辉石低，且经常与低温高压的矿物共生，当岩石中存在蓝闪石、硬柱石等矿物时，就应注意岩石中可能有硬玉产出。硬玉常部分转变为透闪石和假像纤闪石。

形成条件和地质产状 在高压低温条件下钠长石分解形成硬玉和石英。硬玉主要产于蓝闪石-硬柱石相的变质岩中，它经常与硬柱石、蓝闪石、霞石、绿帘石、黑硬绿泥石、绿泥石和石英等低温高压的矿物共生，硬玉多产于变质基性岩屑砂岩中。

17. 绿帘石 (epidote)



单斜晶系

草绿色及暗绿色，沿 b 轴伸长呈柱状，晶面有纵纹，集合体呈放射状及粒状， $\{001\}$ 解理完全， $\{100\}$ 解理次之。

显微镜下 黄绿—浅黄色， Nm 方向（即平行柱面方向）色最深，正高突起，垂直柱面方向晶形完好时呈六边形，该切面上有两组解理，解理夹角为 65° ，比辉石的解理夹角要小，但较角闪石的要大。干涉色可达Ⅱ级，鲜艳而明亮，在同一切面上干涉色分布不均匀，有时呈环带状，当绿帘石为Ⅰ级干涉色时，经常呈现灰蓝、姜黄等异常干涉色。由于帘石类矿物沿 b 轴延长，且 $b \parallel Nm$ ，因而柱状切面皆平行消光，延性（+）、（-）不定，其它切面为斜消光，消光角 $a \wedge Ng = 25^{\circ}-30^{\circ}$ 。二轴晶，（-）光性， $2V$ 较大。

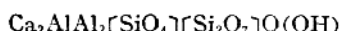
绿帘石与单斜辉石易混淆，两者的区别是：①辉石两组解理夹角近 90° ，而绿帘石为 65° ；②绿帘石柱状切面为平行消光，而单斜辉石除（001）切面为平行消光以外，均为斜消光；③绿帘石具有一股辉石所没有的异常鲜艳的干涉色；④单斜辉石多为（+）光性，而绿帘石为（-）光性。

形成条件和地质产状 绿帘石是含 Fe^{3+} 的钙铝硅酸盐矿物，辉石、角闪石和斜长石在退化变质作用中均能被绿帘石置换。绿帘石中的铁大部分处于 Fe^{3+} 状态，随着温度升高，绿帘石分解释放的 Fe^{3+} 多被还原成 Fe^{2+} 进入到暗色矿物中，而释放出来的Ca和Al，大部

分进入到斜长石中,使斜长石变得更为基性。绿帘石的稳定性不仅取决于温度和压力,也受 P_{H_2O} 和 P_{O_2} 的控制,在氧化条件下,绿帘石是稳定的。

绿帘石是绿片岩相中常见的矿物,它常与绿泥石、钠长石、阳起石、碳酸盐矿物共生,形成各种绿片岩。它也可以与斜长石、普通角闪石共生,形成绿帘斜长角闪岩。在高压绿片岩相—低角闪岩相变质条件下,在不纯的含泥质碳酸盐岩石中,绿帘石与钙铝榴石、钙长石、符山石和碳酸盐矿物共生,形成大理岩或钙硅酸盐岩石。在高压相系中它经常与葡萄石、硬柱石、绿纤石、蓝闪石等矿物共生产出。

18. 黝帘石和斜黝帘石 (zoisite and clinozoisite)



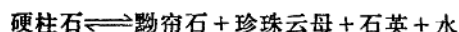
斜方晶系
单斜晶系

黝帘石和斜黝帘石在手标本上色较浅,呈浅灰色或灰绿色,其它物理特性与绿帘石相似。

显微镜下 无色,其光学性质与绿帘石相似。它们与绿帘石区别在于:①多色性不同,绿帘石呈浅黄绿色,而黝帘石和斜黝帘石均为无色;②绿帘石干涉色达Ⅱ级,呈异常的鲜艳明亮,而黝帘石和斜黝帘石为Ⅰ级的灰蓝色、靛蓝色和锈褐色的异常干涉色,但 β -黝帘石的干涉色为Ⅰ级灰白;③黝帘石是斜方晶系故为平行消光,而绿帘石和斜黝帘石为斜消光;④绿帘石为(-)光性,而黝帘石类为(+)光性。

黝帘石和斜黝帘石的区别在于:①黝帘石为平行消光,而斜黝帘石为斜消光;②黝帘石 $2V$ 较小,而斜黝帘石 $2V$ 较大。

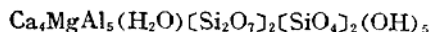
形成条件和地质产状 黝帘石和斜黝帘石是钙铝硅酸盐矿物。绿纤石、硬柱石、葡萄石等矿物在温度升高时不稳定,转变为黝帘石和斜黝帘石,下列变质反应显示了这种关系:



H. G. F. Winkler (1976) 将上述变质反应作为很低变质级进入到低变质级(相当于绿片岩相)的临界反应,故黝帘石和斜黝帘石也是进入绿片岩相的标志矿物。

黝帘石和斜黝帘石在基性系列的绿片岩中广泛存在,它们经常与阳起石、绿泥石、钠长石等矿物共生。在变质的不纯碳酸盐岩石中,黝帘石和斜黝帘石也是常见的矿物之一。在较基性的斜长石中,经常见到细小粒状(或柱状)的黝帘石和斜黝帘石的集合体,致使斜长石表面呈黑灰色,由于斜长石中部分Ca和Al转变为黝帘石和斜黝帘石,而使斜长石号码降低,这种特征称为斜长石的钠黝帘石化它可由热液蚀变产生,也可由退化变质作用形成。

19. 绿纤石 (pumpellyite)



单斜晶系

绿纤石成分与绿帘石相近,但Mg、Al和水的含量要高些,常呈柱状或放射状集合体产出。

显微镜下 无色—浅黄绿(绿)色多色性,其光学性质与帘石类矿物相似。与绿帘石区别在于:①绿纤石干涉色较低,在Ⅰ级顶部—Ⅱ级底部;②绿纤石为(+)光性。与斜黝帘石区别在于:①绿纤石干涉色稍高,而斜黝帘石经常为Ⅰ级异常干涉色;②绿纤石消光角 $\alpha \wedge Np = 11^\circ - 39^\circ$,而斜黝帘石 $\alpha \wedge Np = 0^\circ - 12^\circ$;③绿纤石 $2V$ 在 40° 左右,而斜黝帘