中国科学
1992年 10 月　　B 辑　　第 10 期

高压变质岩中角闪石晶内滑动的电子显微镜研究*

王启明

(北京大学电子显微镜实验室，北京 100871)

崔文元　魏春景　　赵中岩　张儒媛

(北京大学地质学系，北京 100871)　　(中国科学院地质研究所，北京 100029)

摘　要

本文利用电子显微镜研究了江苏东海榴辉岩中的角闪石和陕西鱼洞子群变质角闪岩中的角闪石微结构，发现这些角闪石存在位错和其他缺陷．在榴辉岩的角闪石中，位错为刃型位错，刃位错线平行 c 轴，$\boldsymbol{B}$矢量值为 9 Å，矢量方向有两类：大多数//[100]，少数//b 轴．位错露头在a^*-b^*面上线型排列成位错壁．位错壁两侧的亚晶粒有微小的取向偏差，形成2 — 5° 的小角晶界，且刃位错露头间隔越密，晶体扭曲越大，小角晶界也越大．在含水条件下角闪石通过交代反应，逐步增宽 pyribole 链体，在剪切带内生成滑石结构，并不断把角闪石颗粒细粒化．

关键词　角闪石、高分辨电镜、刃位错、Pyribole

岩石的塑性变形是通过造岩矿物的晶体塑性流变完成的．因此，研究各种构造环境下不同矿物的晶体微观变形特点、变形机制和变形过程，对于研究岩石圈构造演化具有十分重要的意义．最近 20 年来，这方面研究最多，了解最清楚的是橄榄石、石英，其次是方解石、辉石等矿物[1—3]．对角闪石位错构造和塑性流变的研究，报道很少，特别是对与板块碰撞作用有关的高压相岩石中角闪石晶格缺陷的研究则未有报道．本文利用高分辨电子显微镜研究高压碰撞带内榴辉岩和蓝片岩中角闪石的位错构造和晶体缺陷，并探讨在少水和富水环境下，角闪石的变形机制．

角闪石是双链状硅酸盐．硅氧四面体连成的双链平行角闪石 c 轴，链与链之间由阳离子充填．小半径阳离子，如 Fe^{2+}，Fe^{3+}，Mg^{2+} 等充填在 M_1，M_2 和 M_3 位置上，大半径耻离子，如 Na^+，Ca^{2+} 等充填在空隙较大的 M_4 或 A 位上．如果沿角闪石 c 轴投影，即(001)面的二维角闪石结构，可以将角闪石分割出最小的重复结构单元，常称为 I 束(I-Beam)[4]．本文讨论的角闪石属单斜晶系，空间群 $C2/m$，其晶胞参数

1991-06-11 收稿，1992-01-23 收修改稿

*国家自然科学基金和中国科学院地质研究所岩石圈构造演化实验室资助项目

$a=9.8$ Å, $b=18.0$ Å, $c=5.3$ Å, $\beta=104°$. 单斜角闪石根据化学成分可大致分成钙质系列、钠质系列和钠钙质系列. 根据 Leake[4] 和 Smith[5] 分类方案,本文论述的角闪石属 Nyböite, 镁红闪石(Taramite)(榴辉岩)和阳起石(角闪岩),其化学成分见表1.

表1 角闪石的电子探针分析表

样 号	采样地点	名 称	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	总 量
E88J4	江苏碱厂	Nyböite	50.14	n.d	12.97	9.39	n.d.	12.82	3.62	8.44	0.32	97.70
E87D2	江苏孟中	镁红闪石	46.28	n.d.	17.07	2.83	n.d.	15.86	11.10	2.86	0.00	96.00
878-27-16	陕南鱼洞子	阳起石	54.72	0.20	3.16	4.25	0.04	21.01	12.27	0.70	0.22	96.57

一、样品描述和实验方法

本文研究的角闪石有两类: 一类赋存于含水或结构水非常少的榴辉岩中,另一类产自相对富结构水的角闪岩中,样品 E87D2 采自江苏省孟中超基性岩中的榴辉岩,岩石矿物组合为石榴石、绿辉石、蓝晶石、金红石、黝帘石和镁红闪石. 根据石榴石-单斜辉石矿物对估算榴辉岩形成的温度在 800— 900°C,压力为 25kbar 以上[1]. 样品 E88J4 采自江苏省碱厂片麻岩中榴辉岩块体,岩石的矿物组合为石榴石,硬玉质辉石、蓝晶石、角闪石、石英、帘石和金红石,角闪石为 Nyböite. 石榴石-单斜辉石温度计给出的温度为 735°C,压力在 25kbar 以上[1]. 压力的估计主要依据上述榴辉岩区发现的柯石英及其假象. 角闪岩样品 878-27-16 采自陕南鱼洞子群变质岩的逆冲断层带中,岩石经历了蓝片岩相变质作用,遭受了强烈变形和热液蚀变. 岩石组成为阳起石、冻蓝闪石、绿泥石和滑石等含水矿物.

在偏光显微镜下,Nyböite 样品非常新鲜,无蚀变痕迹. 角闪石可达数毫米,呈半自形和它形晶充填在辉石和石榴石之间,或呈包围边出现,是榴辉岩形成过程中 A 阶段产物[5]. 镁红闪石样品,角闪石略显浊色,半自形呈充填状. 高倍偏光显微镜下可见一些长直叶片,怀疑为出溶条纹. 角闪石颗粒度较 Nyböite 样品更细,并有轻微蚀变迹象. 变质角闪岩中的阳起石,扭曲、波状消光十分明显. 一些阳起石边部变成冻蓝闪石. 矿物粒度很大,可达 1cm,有明显的绿泥石化,也可能有滑石生成,是晚期热液蚀变的产物.

电子显微镜制样主要采取离子减薄法,样品取定向切片,主要为$\perp c$ 轴切面,少数为$//c$ 轴切面. 采用 JEM200CX 侧插分析型电子显微镜,加速电压为 200 kV,束流为 130 μÅ,光斑 2,聚光镜光栏 φ 300 μm,物镜光栏 φ300μm,双倾台倾角 ±30°,少数样品观察时冷指加灌液氮. 一般高分辨晶格象分辨率为 4 Å,放大倍数 20 万倍. 另外样品还需蒸镀约 50Å 厚的碳膜,导电用. 电子显微镜观察均采用明场条件.

二、电子显微镜观察结果

1. 角闪石位错线方向测定

电子显微镜下观察高压角闪石,可见许多缺陷条纹,常称位错衍衬(图版 I-1). 任意切面下的位错衍衬条纹,其长度随切面旋转而变化. 当与 c 轴平行时,位错条纹消失,只显示位错

1)张儒媛, High pressure metamorphic rocks in Su-Lu and Dianxi region, China, 1990, 博士论文

露头．因此可测得位错线平行角闪石c轴，即和双链延伸方向一致．另外从位错衍衬象上可知线型位错分成两组排列，两组之间或交叉排列或首尾衔接呈菱形．

2. 镁红闪石

低倍电子显微镜下，大多数观察到的区域，角闪石结构相当完整，没有明显的缺陷和反应残留界面．只在一些局部地方，如颗粒边缘，解理面周围可见晶体的应变衍衬象，表示这些局部位置有缺陷引入．大颗粒角闪石被分割成许多细小颗粒，小颗粒的边界是由一些密度很高的缺陷构成的．颗粒越细，边界的缺陷密度越大，稍大一些的颗料，其边界的缺陷密度略疏些．高倍电子显微镜观察$\perp c$轴切面，可见应变与位错露头有关．这些位错露头沿一条线成密集排列，形成位错壁．位错露头可以观察到沿两个方向排列，一是$//(100)$，一是$//(110)$．这两个方向组合起来形成位错壁将角闪石进一步细粒化．每个位错露头相互之间间距相当固定，细颗粒的位错壁边界，其位错露头间隔要密些，彼此相隔 18 — 20 条角闪石的双链宽．大些颗粒的位错壁边界，其位错露头之间间隔要稀疏些，可达 26 — 30 条角闪石的双链宽．

高分辨电子显微镜观察位错露头，无一例外地表明是刃型位错(edge dislocation)，即在位错露头位置一端多出一条双链，并且所有位错露头多出一条双链(或半原子面)的方位都相同，亦即标志刃位错$\perp$的记号都朝某个固定方向，而不是相反指向排列的(图版 I-2)．这表明这些位错不会在滑移过程中相互抵消而消失，只会向两侧移动，尖灭在晶粒的表面上．这些同向排列的位错还表示剪切应力的作用是持续的，形成一套位错滑移系列．由于位错线方向平行c轴，且刃型位错的$\boldsymbol{B}$矢量垂直位错线，落在a^*-b^*平面内，因此可以从$\perp c$轴的晶格象上直接测出$\boldsymbol{B}$值来，为一条角闪石的双链宽度，即 9Å．这是一个相当大的值，几乎是金属$\boldsymbol{B}$矢量的一倍．$\boldsymbol{B}$矢量的方向也可以从高分辨晶格象上判得．在测量几十张照片的基础上测出的方向有两类，一类刃位错多出的一条链体平行(010)，滑移矢量垂直该面，则为$//b$轴；另一类多出一条链体$//(110)$，滑移矢量$//[100]$方向，但两个不同方向的滑移矢量值大小相同，都为 9Å．在镁红闪石样品中，第二类滑移矢量占大多数．

这些刃位错露头平行排列形成位错壁，壁相邻晶粒由于位错、取向有很小的差别．测得的两位错间隔 20 — 30 条角闪石双链宽，由公式$\theta=b/D$，可得小角晶界的角度为 2 — 3°，这与图版 I-2 上观察完全吻合．镁红闪石中可观察到两套滑移系，一套$\boldsymbol{B}$矢量方向$//[100]$，另一套$\boldsymbol{B}$矢量方向$//b$轴．由这两套滑移系作用逐步将大颗粒角闪石分割成细小颗粒，成为构造运动过程中粒内细粒化过程在微观上的表现．按一般规则，滑移系多由密排面和密排方向组成，因此容易产生在面网间距小的方向上，即沿角闪石c轴(5.3Å)．但在镁红闪石中，滑移方向也产生在$\perp c$轴平面上．这套发生在较难产生滑移的面上的滑移系可能与高应力有关，也可能与角闪石(110)解理面有关，因为解理面的键力最弱，容易发生滑移．在$\perp c$轴观察到的滑移系是新的滑移系，未曾见其他文献中报道过．

叶片状结构在高倍电子显微镜下清晰地显示为 pyribole 链结构体．这些 pyribole 都严格地$//(010)$，并且从角闪石线型位错的位置上生长出去(图版 I-3)．pyribole 的链体宽度，如果将角闪石的结构算成 2(双链)的话，大多数为3 链宽，也有一些为 4 链或 5 链宽的．样品找不到有超过 5 链宽的 pyribole 产生．pyribole 的分布相当稀疏，完全由线型位错的露头控制，因而分布也是局部的．电子显微镜的观察可以肯定 pyribole 的生成是在位错形成之后，而位错的分布和密度、位错类型与镁红闪石在榴辉岩阶段的变形有关．

3. Nyböite

Nyböite 中的位错形态与镁红闪石有许多相似之处，所不同的是 Nyböite 中只有晶格扭曲和位错，看不到 pyribole 产生(图版 I-4)。刃位错露头的间隔更小，多为 12 — 14 条双链宽者，少数也见 16 条双链宽者。刃位错的朝向亦相同，***B***矢量大小也为 9Å，方向也有两类，与镁红闪石中所描述的一样。由于其位错间隔更小，位错密度增大，推测应力值会更大。高密度位错形成的位错壁，其相邻两侧的晶粒取向差别更大，小角晶界的角度可大到 4 — 5°。在低倍电子显微镜下观察Nyböite 样品，可见颗粒较大的闪石在平行 X^* 方向有一条应变带，带内有许多平行(110)解理的微错裂，有的地方还因受力形成由(110)解理面围成的菱形空隙。而带两侧的晶体结构相当规则，看不到有缺陷的引入。说明角闪石受定向应力时，在一些局部位置，或沿一定方向角闪石产生扭曲、错动，引入大量位错，形成位错壁或亚晶界，并且沿解理面方向发生破裂。

4. 阳起石

渔洞子群的角闪岩中阳起石，偶尔能见一些刃位错露头的残余，这些露头排列成几组，每组内有 5 — 6 个刃位错露头，相互间隔非常规则，为 62 — 64 双链宽。组与组之间的间隔更大些，可达 90 条双链宽，排列尤如雁行列式。位错多出一条链的方向，朝向相同，方向 ∥(010)，滑向 ∥b 轴，***B***矢量值为 9Å。但比较常见的位错型式是分位错类型(partial dislocation)，不象前述的刃位错，***B***矢量值有 9Å，分位错是由一小区域角闪石双链，左边部分错出 4.5Å，右边部分错出 4.5Å，整个小块合起来错出 9Å。这一小区域在角闪石中形成一个小晶畴，晶畴顶端形成一个微小断裂，与主体分开(图版 I-5)。这类分位错形式在热淤蚀变的角闪石中十分普遍，由于 ***B*** 值小，因此所需应力和能量都低。

阳起石中观察到的 pyribole 链体更宽，可达 10 链以上。并且可见 pyribole 终止在晶体中某些区域是原先位错的位置，只是由于 pyribole 增宽，位错被掩盖了，有时这些 pyribole 是如此之宽，它们已经转化成层状的滑石结构。(图版 I-6)显示滑石与角闪石反应的结构关系。可以看出两者的结构是非常有规则的，角闪石 a 轴平行滑石 c 轴，角闪石 c 轴平行滑石 a 轴，两者 b 轴保持不变。这种晶格之间严格的定向反应称行衍取代(Topotactic Replacement)，曾由 Veblen 和 Buseck[6] 描述过。滑石的生成将角闪石分割成许多小颗粒，颗粒之间由滑石结构联结。由于滑石很软，容易变形，也容易传递应力，故在应力或剪切运动强烈的地方，滑石也多。一些滑石有明显的扭曲，有的扭了 10°，有的扭成 S 形状(图版 I-7)。这种扭曲造成相邻的角闪石颗粒有微小的角度偏差，在宏观上可反映波状消光的特点。这些造成波状消光的扭曲滑石强烈显示在滑石生成的过程中或之后，有构造形变发生，它们可能是与某期构造运动同期的产物。

绿泥石是最常见的阳起石蚀变矿物，排列方向完全由角闪石解理面控制，但与之有 5 — 10°的夹角。一些局部地方还可以见绿泥石取代滑石的反应残留界面(图版I-8)。当 14Å 绿泥石取代 10Å 滑石时，由于多出 4Å，在反应界面上形成结构扭折，造成应变的衍衬象。可以从微结构上断定绿泥石晚于滑石生成，并且受角闪石解理面控制，或换言之由剪切滑移面控制。因此绿泥石的生成与应力作用也有密切成因关系。

三、讨 论 和 结 论

从电子显微镜照片所描述的现象看，含水很少的岩石(可以认为 $P_{H_2O} < P_{总}$)其角闪石

的晶内滑移和细粒化过程与含水高的片岩(可以认为 $P_{H_2O} \approx P_{总}$)中角闪石的粒内细粒化过程是不同的. 少水条件下,角闪石的晶内滑移是通过产生刃位错、位错增值、位错滑移并沿某些方向位错定向排列形成位错壁,进而形成小角晶界,颗粒变细,从而达到应力传递和闪石细粒化的. 在细粒化过程中,由于水分压很低,不能形成含水的 pyribole 链结构体,只能以位错的形式滑移,而且主要的刃位错形式是 ***B*//[100]**. 说明在少水的榴辉岩内,角闪石变形机制是位错蠕变.

图 1(a)表示榴辉岩中角闪石的位错排列形态. 对于一个单独的刃位错,多出一条链的上部晶格受横向压缩,下部晶格受横向拉伸,因此力是不平衡的. 当位错上下连成一条直线排列起来,压拉应力交替相互抵消,这样的刃位错组合是一个稳态组合,即沿图 1(a)中虚线方向移动而排列起来. 这样排列的位错,其应力场只在两位错之间间距 D 为半径的圆内,之外位错应力场为零. 从图 1 中可以看出镁红闪石中存在的刃位错要移动比较长的距离之后才能达到稳态组合. 因此刃位错组合形成的位错壁并非是稳态的,位错还会移动直至达到稳态,这样位错壁会发生移动,从而亚晶粒大小也会发生变化.

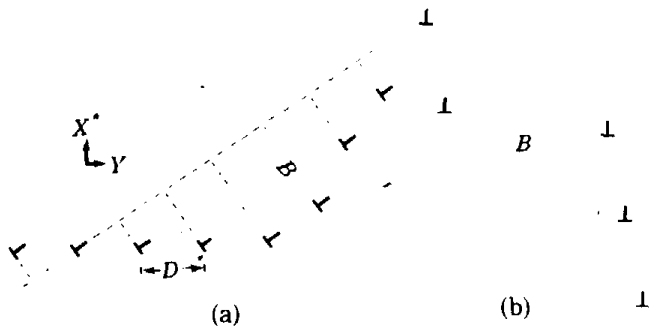

图 1　刃位错形成的小角晶界和位错壁

(a)镁红闪石中刃位错露头失稳态排列; (b)阳起石中刃位错近稳态排列

而含水的片岩或蚀变角闪岩中角闪石粒内滑移不仅有位错移动,更大量的看到 pyribole 和滑石,它们在细粒化过程中有重大贡献. 含水条件下,角闪石也产生位错,其位错多数 ***B*//*b*** 轴,并且组合是近稳态的(图 1(b)). Pyribole 的延长和增宽生长需要不断补充结构水,其生长平行角闪石 a 轴的速度要远远快于其加宽的速度. 只有在水存在较充分的地方,链体加宽的速度,即滑石化的转化加快. 角闪石转化成滑石的反应是一个交代的过程,反应过程中伴有 Ca^{2+}, Na^{+} 等组分的带出和 H_2O, Mg^{2+}, Fe^{2+} 等组分的带入. 对岩石应变软化的机制一般认为有三种:均衡传递孔隙压力使裂隙受到水压而扩展;增加润滑性,减少裂隙两壁间滑动阻力;对矿物晶键的弱化作用. 这些机制大都是物理过程. 从图版 I 中看到角闪石粒内生长的 pyribole 和滑石,说明这些过程还伴有化学反应,使得物质成分改变形成新的层状硅酸盐矿物. 这也是角闪石或其他链状硅酸盐晶内滑动的重要方式. 滑石或绿泥石具有易滑动的解理面或滑移面,使岩石易于变形,应力易于传递,同时易于产生更大的空间便于流体运动和进一步发生交代反应. 可见在富水环境下,角闪石的变形不仅表现为位错蠕变,更重要的是物质的扩散迁移,产生低强度的新物质.

参　考　文　献

[1] Weathers, M. S. et al., *J. Geophys. Res.*, **84**(1979), 7495 — 7509.

[2] Durham, W. B. et al., *J. Geophys. Res.*, **82**(1977), 5755 — 5770.

[3] 刘瑞珣.显微构造地质学, 北京大学出版社, 1988.

[4] Leake, B. E., *Am. Mineral.*, **63**(1978), 1023 — 1053.

[5] Smith, D. C. (ed.), *Eclogites and Eclogite Facies Rocks*, Developments in Petrology, Vol. 12, 1988, 1 — 206.

[6] Veblen, D. R. & Buseck, P R., *Am. Mineral.*, **65**(1980), 599 — 623.