中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 1 期: 52 ~ 60
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

角闪石变形变质过程及其变形机制—以山西恒山地区斜长角闪岩为例

纪沫[①②], 胡玲[②*], 刘俊来[②], 申亮[②], 邹运鑫[②], 宋鸿林[②], 苗培森[③]

① 中海石油研究总院, 北京 100027;
② 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;
③ 天津地质矿产研究所, 天津 300170
* 联系人, E-mail: hulin1028@gmail.com

收稿日期: 2011-12-08; 接收日期: 2012-05-17
国家自然科学基金(批准号: 40772133)资助

摘要 山西恒山变质岩中斜长角闪岩经历了复杂的变质变形过程, 为角闪石塑性变形提供了深入研究的契机. 本文通过对变形角闪石样品的显微构造观察、电子探针分析和变形条件估算确定恒山地区斜长角闪岩的变质变形过程可分为二个阶段: (1) 变质反应(~775℃, 0.585 GPa), 原岩辉长岩中辉石退变为角闪石, 形成近等粒状角闪石冠状体; (2) 局部韧性剪切变形过程(650~679℃, 0.770~0.914 GPa), 近等粒状新生角闪石和亚颗粒旋转斜长石发生递进变形, 形成角闪石集合体残斑结构和强定向排列等变形组构, 应变量>1000%. 进一步的 EBSD 组构和 TEM 亚微构造分析, 发现递进变形过程中等粒状角闪石和斜长石颗粒内部位错等亚微构造发育微弱, 在组构极密投影图上仅在强变形部位出现{100}<001>滑移系的优选, 新生等粒状角闪石集合体由残斑结构变形为强定向排列组构的过程中发生了超塑性流动, 其变形机制以颗粒边界滑移为主.

关键词
角闪石
颗粒边界滑移
山西恒山
变质变形演化

岩石圈七类主要造岩矿物(方解石、石英、长石、黑云母、角闪石、辉石和橄榄石)的塑性变形行为, 是人们了解地壳到地幔各层次结构、流变学特征及动力学演化的重要途径[1,2]. 作为了解中下地壳力学与流变学表现的重要依据之一[2~9], 角闪石塑性变形行为的研究具有重要意义. 角闪石广泛存在于不同构造环境的岩石中, 它可以记录地壳浅部和深部等不同构造层次的动力学过程. 脆性变形主要源于{110}面完全解理, 岩石中核幔结构的细粒基质可能主要由碎裂而不是由动态重结晶作用形成. 角闪石在温度超过 450~500℃时开始出现晶质塑性变形[10]. 低温和/或高应变条件下, 角闪石的变形主要由($\bar{1}$01)或(100)双晶变形和(100)[001]滑移完成. 在较低温度或有流体作用加入时, 角闪石的主要变形机制是碎裂流动和溶解沉淀(扩散蠕变)[8,11]. 与此同时, 化学组分变化的影响力明显强于应变作用. 角闪石常常分解为组分不同的闪石[12,13]或其他矿物如绿帘石、钠长石及黑云母等[5]. 650~700℃以上高温和/或低应变条件下, 在含水流体低的干岩石中角闪石开始出现晶质塑性变形, 表现为亚晶粒旋转重结晶和恢复作用. 发育多

中文引用格式: 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 等. 角闪石变形变质过程及其变形机制——以山西恒山地区斜长角闪岩为例. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 52–60
英文引用格式: Ji M, Hu L, Liu J L, et al. The process and mechanisms of metamorphism and deformation of hornblende—An example from the Hengshan Mountains, Shanxi Province. Science China: Earth Sciences, 2012, 55: 1987–1995, doi: 10.1007/s11430-012-4469-1

组滑移系, (hk0)[001]和{110}1/2〈$1\bar{1}0$〉和(100)[100]. 亚晶粒平行 c 轴生长, 亚晶粒边界由[001], [100]或〈110〉位错组成, 同时平行于{110}, (100)或(010)[14,15~18]. Passchier 和 Trouw[11]认为, 角闪石发生晶质塑性变形比较困难, 其韧性变形温度条件甚至比橄榄石还要高. 然而, 通过对不同变质相条件下主要造岩矿物动态重结晶变形组合的综合分析研究, 纪沫等[19]获得新的主要造岩矿物脆-韧性转变序列, 角闪石的脆－韧性转变位次提前到长石和橄榄石之间. Boullier 和 Guéguen[20]报道了角闪石超塑性变形. 角闪石作为二轴晶含水矿物, 在不同温压条件下, 极易发生成分改变和变质作用, 因而对其变形作用的研究非常困难. 到目前为止, 有关角闪石的天然变形研究和实验岩石学研究资料几乎是主要造岩矿物中最少的, 也为后来研究者保留了更大的空间.

山西恒山变质基性-超基性岩脉(即斜长角闪岩)经历了复杂的变质及变形过程, 为角闪石变形变质的深入研究提供了契机. 本文对恒山地区斜长角闪岩开展了详细的显微构造观察分析, 并通过电子探针分析确定了角闪石和斜长石等矿物的矿物化学特征, 以及岩石变质变形过程的 *P-T-t* 轨迹, EBSD 组构分析反映了新生角闪石矿物集合体从形成、弱变形到强变形过程中晶格优选方位的变化特征, 通过 TEM 分析了矿物颗粒内部位错构造发育特点, 并综合探讨了该区角闪石的变形机制.

1 区域地质背景

恒山中深变质岩区, 亦即恒山高级变质岩区, 位于华北克拉通近中部, 北接内蒙古-大同-怀安麻粒岩区, 南与五台山花岗岩-绿岩区及阜平高级变质岩区相接. 该区主要由太古宙高级变质基底及穿插于其中的早元古宙绿岩岩片构成, 显示高级-低级变质岩区过渡特征[21,22]. 苗培森[22]将恒山地区地质事件划分为六个阶段: (1) 中太古代陆核阶段(>2800 Ma), 发育古老表壳岩(BIF); (2) 新太古代被动大陆边缘阶段, 土岭灰色片麻岩(TTG, 英云闪长质片麻岩 2600 Ma±)发育近水平韧性剪切, 五台岩群(基性火山岩)侵位于 2600~2530 Ma, 镁铁质侵入岩席(早期高压麻粒岩)侵位于 2700 Ma, 镁铁质侵入岩席(晚期高压麻粒岩)发生角闪岩相-麻粒岩相变质; (3) 新太古代碰撞造山阶段(2500 Ma±), 花岗岩侵位并发生绿片岩相-角闪岩相变质, 代表主碰撞期造山运动, 即五台运动; (4) 古元古代裂陷海槽阶段(2370~2200 Ma), 沉积滹沱群碎屑岩和碳酸盐岩, 发育少量镁铁质侵入岩; (5) 古元古代陆内造山阶段(2200~1800 Ma), 滹沱期花岗岩侵位, 发生低绿片岩相-角闪岩相变质, 为吕梁运动代表; (6) 中元古代刚性板块裂解阶段, 发育北西向基性岩墙群、非造山花岗岩及环斑花岗岩.

恒山高级变质岩区主要为灰色片麻岩系和五台群两套岩系, 其中灰色片麻岩占 80%以上. 五台岩群(新太古宙)金岗库岩组(Ar_4Wj)与之下土岭灰色片麻岩(Ar_4Tgn)之间, 受到后期强烈的构造改造, 尤其是近水平的韧性剪切使金岗库岩组不同岩性与灰色片麻岩相接触, 呈现明显的构造接触关系. 恒山土岭片麻岩锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为(2520±15) Ma[23], (2701±5.5) Ma, (2455±2) Ma 和(2506±5) Ma[24]. 五台岩群金岗库岩组锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为(2527±10) Ma 和(2501±15) Ma[23]. 与五台山地区五台岩群年龄(2533~2500 Ma)十分接近, 代表了五台运动晚期区域构造热事件, 即碰撞造山事件.

变质基性-超基性岩($Ar_4\Sigma$)在恒山土岭灰色片麻岩及五台岩群金岗库岩组中分布十分普遍, 灰色片麻岩中主要以强烈变形变质改造的所谓“包体”形式产出, 往往成带出现, 一般为明显的石香肠构造, 呈透镜状、椭圆状、长条状等. 五台岩群金岗库岩组及其之下细粒强直片麻岩中主要以层状侵入体形式产出. 变质基性-超基性岩锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为(2499±4) Ma, (1867±23) Ma 和(1827) Ma[23], 具有(1850±) Ma 的变质年龄, 为大量阜平、大同地区的(1900±) Ma 年龄的热响应, 代表了吕梁运动(晚期)构造热事件或造山作用.

恒山地区变质基性岩包体大多经历了高压的角闪岩相至麻粒岩相变质作用, 但不同样品的变质矿物组合及变质结构有比较明显的差异, 包括变质辉绿岩、石榴石角闪岩、石榴石(变斑晶)麻粒岩和石榴石(后成合晶)麻粒岩四种类型[25]. 本文研究样品主要取自雁门关附近(图 1)变质基性-超基性岩脉($Ar_4\Sigma$), 原岩类型为辉绿岩, 露头可见岩浆阶段斜长石形成的三角形结构格架, 未经历麻粒岩相变质作用, 发育大量小型韧性剪切带(图 1(b)), 表现为宽约 10 cm、长约 50 cm 的狭窄强变形带, 主要矿物组合为基性变质

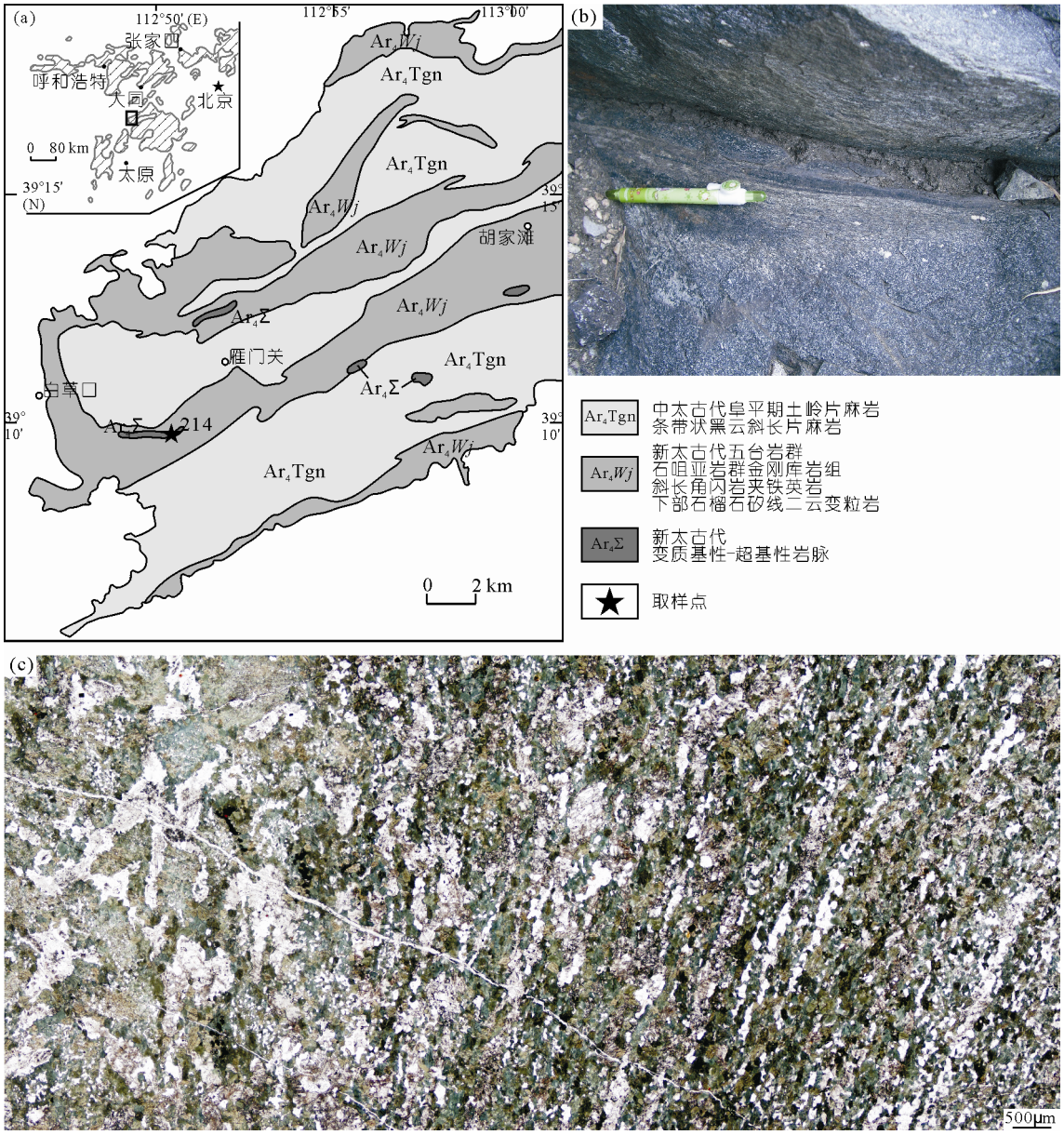


图 1　恒山雁门关地区地质简图和斜长角闪岩宏微观构造特征

据山西省五台山-恒山片区 1: 250000 地质图 [1]; (a) 华北中北部早前寒武纪变质岩分布区与恒山雁门关地区地质简图; (b) 斜长角闪岩局部韧性剪切带野外露头; (c) 斜长角闪岩小型韧性剪切带发育由弱到强变形特征的镜下显微照片

岩角闪岩相变质矿物组合(角闪石、斜长石和石英), 面理、线理发育, 线理由暗色角闪石强烈定向排列组成. 韧性剪切带区域上可能为新太古代被动大陆边缘阶段地质事件同期变形产物, 后期未受到其他阶段变形变质叠加改造, 然而这些韧性剪切带规模较小, 且分散分布于各变质基性-超基性"包体"中, 尽管对于区域构造研究意义不大, 但对于角闪石矿物变形机制的研究具有重大意义.

1) 山西省五台山-恒山片区 1∶250000 地质图, 赵祯祥, 等, 山西省地质调查院, 2003

2 微观构造特征

选取平行线理垂直面理方向, 将研究样品切制成 *XZ* 面定向薄片供显微构造分析. 薄片观察清晰可见小型韧性剪切带, 从边部到中心部位发育由弱渐强的递进变形现象(图 1(c)), 可划分为未变形、弱变形和强变形三个部位.

未变形部位(图 1(c)), 基本矿物组合为斜长石、辉石、角闪石和石英; 斜长石自形板状, 含量约 40%, 构成辉绿结构格架; 辉石半自形柱状呈浅绿色, 主要占据核部, 含量约 30%; 角闪石近等粒状呈黄绿-绿色, 发育于辉石边缘, 含量约 20%, 为辉石退变产物; 石英为辉石退变为角闪石的共生矿物组合, 含量极少, 仅出现在辉石向角闪石过渡的部位. 未变形部位整体表现为继承原岩辉绿结构, 辉石为核部, 近等粒角闪石为后成合晶的变余辉绿结构.

弱变形部位(图 1(c)), 基本矿物组合为斜长石、角闪石、辉石和石英: 斜长石动态重结晶为近等粒状新晶粒, 剪切作用下新晶集合体呈弱定向排列; 新生近等粒状角闪石进一步生长, 含量明显增加(约 35%)具有截然的颗粒边界, 颗粒粒度约 100 μm, 剪切作用下组成残斑的边部和拖尾部分; 辉石进一步退变, 仅存在于残斑的核心部位(约 15%), 明显可见铁质暗色物质的析出; 石英仍作为辉石退变为角闪石的共生矿物组合出现.

强变形部位(图 1(c)), 基本矿物组合斜长石、角闪石; 斜长石动态重结晶新晶粒集合体在剪切作用下呈强定向排列; 新生近等粒状角闪石集合体同样形成强定向排列, 形成贯穿薄片的单颗粒矿物条带; 斜长石与角闪石两组强定向条带构成显微分带构造. 由弱变形的残斑到强变形的条带构造中, 仅以显微照片尺度(图 1(c))观察, 角闪石单颗粒矿物条带长度可达 7 mm, 而角闪石单颗粒直径仅为 30 μm, 条带长短轴比达到 233∶1, 应变量>1000%, 表明样品发生了均匀连续的形变, 即超塑性变形(冶金学提出此概念, 后应用于地质学)[26~31].

综上所述, 恒山地区斜长角闪岩的变形变质过程可划分为二个阶段: (1) 变质反应阶段, 原岩辉绿岩中的辉石退变为角闪石和石英的共生矿物组合, 形成近等粒状角闪石后成合晶冠状体; (2) 局部韧性剪切作用阶段, 形成由弱到强的变形组构, 弱变形部分新生近等粒状角闪石集合体形成残斑结构, 动态重结晶斜长石形成弱定向组构, 而强变形部分近等粒状角闪石和斜长石共同形成强定向排列的显微条带.

3 角闪石矿物化学及温压条件分析

斜长角闪岩样品电子探针成分分析利用中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 JCXA-733 完成, 主要对变形变质过程各阶段的角闪石和斜长石等矿物进行成分测定, 以开展进一步的成分分析和温压推算. 根据电子探针成分分析, 该岩石样品中角闪石均属钙质角闪石, 其中韧性变形(强变形)部分角闪石属浅闪角闪石-亚铁浅闪角闪石-含亚铁准闪角闪石系列, 而变质形成和韧性变形(弱变形)部分角闪石属铁角闪石-钙镁角闪石-亚铁角闪石-亚铁钙镁闪石系列. 韧性变形过程中形成的暗绿色角闪石相对于退变质形成的浅绿色角闪石再次发生了比较明显的退变作用, 但变形之后的角闪石进变质作用却不均匀(图 2), 这与显微镜下的观察结果一致.

山西恒山斜长角闪岩经历了复杂的变质变形过程, 利用角闪石-斜长石矿物组合的温度压力计算公式, 可以推算出该岩石变质变形过程中的温度压力条件. 根据电子探针数据和温度压力计算结果(表 1)分析, 可以得出以下结论:

利用斜长石-角闪石矿物对作温压计算[33,34], 变形过程温度范围为 650.5~679.2 ℃, 压力范围为 0.770~0.914 GPa.

4 TEM 亚微构造分析

本文 TEM 亚微构造分析利用中国地质大学(北京)地学实验中心 Hitachi H-8100 型高分辨率透射电子显微镜完成, 分析过程中利用 EDAX9100 能谱确定矿物成分, 主要对弱变形和强变形部位角闪石和斜长石的亚微构造进行分析.

弱变形部分斜长石局部出现自由位错(图 3(a)), 而强变形部分斜长石则极少出现位错构造(图 3(b)); 弱变形和强变形部分角闪石均极少和/或不发育位错构造(图 3(c), (d)), 强变形样品中可见角闪石颗粒发育平直的颗粒边界, 而非位错构造组成的亚颗粒边界(图 3(e)). 可能说明斜长石和角闪石在递进变形过

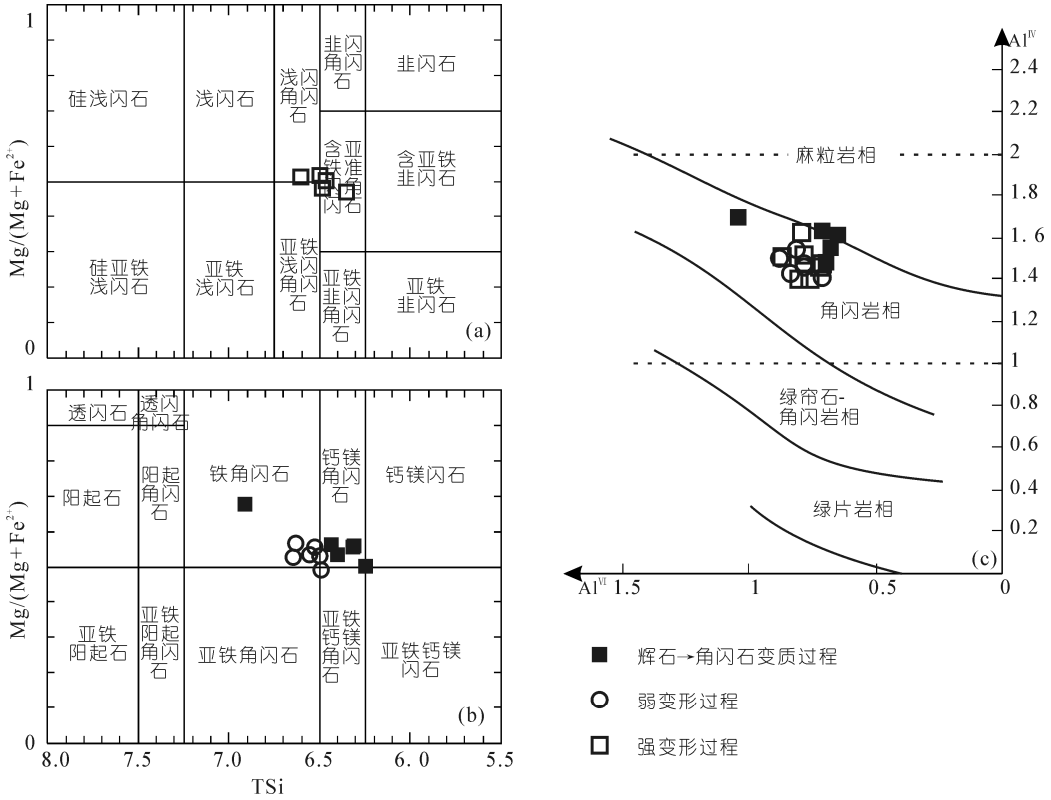


图 2　角闪石矿物化学及 Al^{IV}-Al^{VI}变异图

(a), (b) 角闪石矿物化学成分分类; (c) 角闪石 Al^{IV}-Al^{VI}变异图[32]

表 1　温压条件计算结果

弱变形过程(斜长石-角闪石)							
样品	214-b-2	214-b-7	214-b-11	214-b-12	214-b-13	214-b-14	均值
T(℃)	679.16	673.38	674.15	650.48	672.63	667.78	669.60
P(GPa)	0.791	0.858	0.868	0.770	0.812	0.818	0.819
强变形过程(斜长石-角闪石)							
样品	214-A-1	214-A-3	214-A-5	214-A-7	214-A-9	214-A-11	214-A-13	均值
T(℃)	655.68	668.46	654.59	655.92	659.27	655.35	666.80	659.44
P(GPa)	0.786	0.878	0.807	0.794	0.788	0.914	0.841	0.830

程中, 位错蠕变变形机制不占主导地位, 促进矿物颗粒生长的扩散蠕变机制起到更为积极的作用, 矿物颗粒可能以刚性体形式发生旋转和相互错动, 即颗粒边界滑移[35~39].

5　EBSD 晶格优选方位分析

本文 EBSD 晶格优选方位组构分析主要对样品未变形、弱变形和强变形部位角闪石的晶格优选方位进行了测量和分析. 利用中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室 S-3400N 扫描电子显微镜的 EBSD 组件完成, 加速电压为 15 kV, 工作距离为 23 mm, 晶格优选方位极密图统计由 Channel 5 软件完成, 数据的表达利用下半球投影的结构平面图, 面理平行于*XY*面, 线理平行于*X*轴, 选取与角闪石主要滑移系和双晶面有关的晶系和晶棱进行极密投影, 结果如图 4 所示.

未变形阶段变质部分, 辉石退变形成新生近等

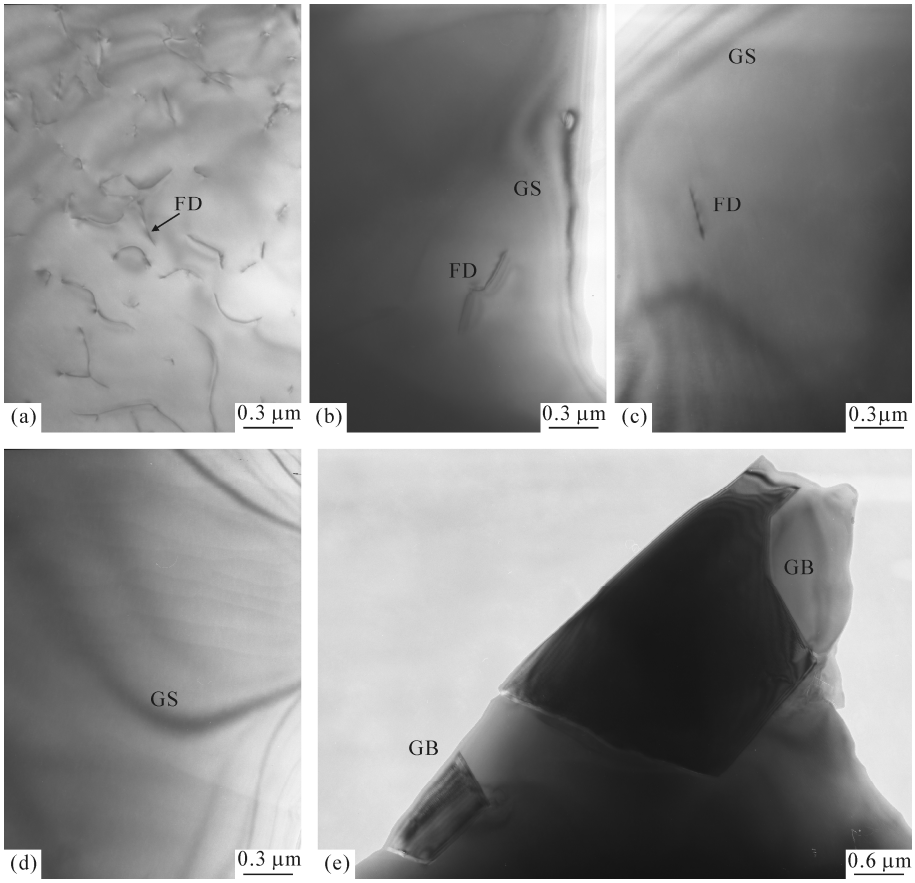


图 3　恒山斜长角闪岩 TEM 亚微构造特征

(a) 弱变形部位斜长石颗粒内自由位错; (b) 强变形部位斜长石颗粒内少量位错构造; (c) 弱变形部位角闪石颗粒内两条自由位错; (d) 强变形部位角闪石颗粒内无位错构造发育; (e) 强变形部位角闪石颗粒具有平直颗粒边界; FD-自由位错; GB-颗粒边界; GS-厚度条纹

粒状角闪石反应环带, 投影图中角闪石颗粒未表现出晶系和晶棱的优选, 说明此阶段新生角闪石颗粒不具备晶格优选方位(图 4(a)); 韧性剪切的弱变形部位, 角闪石集合体经韧性剪切作用发育残斑结构, 投影图中角闪石颗粒亦未表现出优选方位, 说明此阶段新生角闪石颗粒仍不具备晶格优选方位(图 4(b)); 韧性剪切的强变形部位条带状角闪石集合体的强定向组构在投影图中的{100}和<001>上表现出平行于 *XY* 面和 *X* 轴的强优选(图 4(c)), 推测等粒状角闪石集合体在递进变形过程中, 形成了{100}平行于 *XY* 面(面理), <001>平行于 *X* 轴的结晶学优选方位(LPO), 即镜下观察所见角闪石矿物集合体的强定向组构. 新晶粒在构造应力作用下形成结晶学长轴方向平行 *X* 轴即矿物线理方向的强晶格优选方位(LPO), 但受第二相矿物(斜长石)存在的影响, 没有形成明显的形态优选方位(SPO)[40~42].

6　讨论与结论

超塑性变形最早由冶金学家提出, 定义为拉伸应变量达 1000%以上而不出现缩颈和断裂的变形变现. 天然变形岩石中出现的超塑性以结构超塑性为主, 岩石的结构超塑性具有以下特征: (1) 高温条件下进行($T/T_m \geqslant 0.5$); (2) 颗粒细小且大小稳定, 地质条件下应变速率在 10^{-10}~10^{-14}/s, 颗粒粒径可达几十微米甚至上百微米; (3) 应力和应变速率较低; (4) 晶粒自身不被拉长, 晶格优选方位差; (5) 颗粒内部不存在变形亚微构造, 位错密度低; (6) 应变速率灵敏度高(m>0.3, m 为应变速率灵敏度); (7) 岩石由两相组成, 阻止矿物发生重结晶, 促进超塑性蠕变的发育[43,44]. 前人研究表明, 石英[21,45~47]、方解石[48]、长石[49]、橄榄石[50]、辉石和角闪石均可在天然变形条件下发生超塑性变形. Ashby 和 Verrall [51]提出了由扩

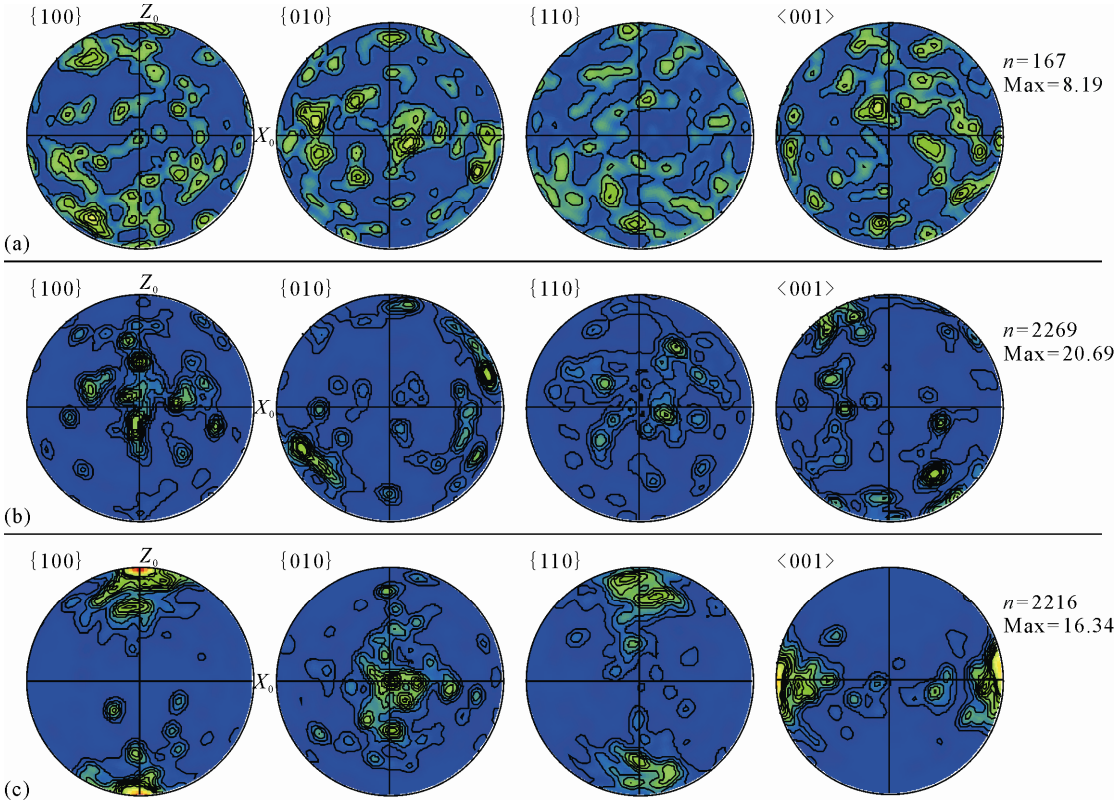


图 4　角闪石 EBSD 分析结果下半球投影的结构平面图

(a) 未变形角闪石; (b) 弱变形角闪石; (c) 强变形角闪石

散蠕变或位错蠕变调节的颗粒边界滑移机制超塑性变形的模型, 超塑性变形后的晶粒内部不发育位错亚构造, 说明超塑性并不是由位错滑移引起的. 多晶体中每个单晶晶粒为周围晶粒所包围, 不能独立自由旋转, 它们靠晶粒在不明显拉长条件下相互滑移, 并促使邻近晶粒的滑动. 这种晶粒边界的滑移必然造成变形的不协调性, 而这种不协调性最可能的调节作用为结构超塑性变形的颗粒边界滑移.

对于恒山地区递进变形的角闪石矿物集合体的综合研究表明, 显微构造观察角闪石晶粒由辉石退变形成, 形态呈规则浑圆状, 粒径约 30 μm, 略大于超塑性变形颗粒粒径, 天然岩石变形条件复杂, 超塑性变形颗粒粒径与应变速率成负相关关系, 因此, 天然变形条件下超塑性变形颗粒粒径可达几十微米, 甚至上百微米[52]; 粒内消光均匀无解理, 仅少量晶粒 (<10%) 略有拉长定向; 变形温度较高, 为 650~679℃, T/T_m>0.5(角闪石 T_m≈1100℃); EBSD 组构反映角闪石颗粒{100}平行于 *XY* 面(面理)、<001>平行于 *X* 轴的晶格学优选方位(LPO), 具有强晶格优选方位(LPO)、弱形态优选方位(SPO)的特点; TEM 观测角闪石晶粒内部位错构造发育微弱, 可见角闪石晶粒发育平直的颗粒边界. 因此, 本文推测韧性剪切过程中位错蠕变变形机制并不占主导地位, 而促进矿物颗粒生长的扩散蠕变机制起到更为积极的作用, 角闪石晶粒可能以独立刚性体形式发生旋转和相互错动. 因此, 本文认为恒山地区角闪石变形机制是以扩散蠕变颗粒边界滑移为主导机制的结构超塑性变形.

综上所述, 本文对于恒山地区斜长角闪岩变质变形过程的研究获得以下结论:

(1) 变形可分为二个阶段: 变质反应(~775℃, 0.585 GPa), 原岩辉长岩中辉石退变为角闪石, 形成近等粒状角闪石冠状体; 局部韧性剪切变形过程(650~679℃, 0.770~0.914 GPa), 近等粒状新生角闪石和亚颗粒旋转斜长石新晶粒形成角闪石集合体残斑结构和强定向排列等递进变形组构.

(2) 递进变形的角闪石矿物集合体应变量达到

甚至超过 1000%, EBSD 组构获得{100}<001>滑移系的优选, 位错等亚微构造发育微弱, 但清晰可见平直规则的颗粒边界, 其超塑性变形机制应为以扩散蠕变颗粒边界滑移为主导机制的结构超塑性变形.

致谢 野外工作中得到山西省地质调查院续世朝老师的大力帮助, 实验测试过程中得到中国地质大学(武汉)电子探针实验室刘惠芳老师, 中国地质大学(北京)透射电镜实验室韩勇老师的帮助, 本文编写过程中得到苏尚国老师和程素华老师的热情指导, 在此一并表示衷心的感谢.

参考文献

1 Brodie K H, Rutter E. On the relationship between deformation and metamorphism with special reference to the behaviour of basic rocks. In: Thompson A B, Rubie D C, eds. Metamorphic Reactions: Kinematics, Textures, and Deformation. Berlin: Springer, 1985. 138–179
2 Barruol G, Kern H. Seismic anisotropy and shear-wave splitting in low-crustal and upper-mantle rocks from the Ivrea Zone—Experimental and calculated data. Phys Earth Planet Inter, 1996, 95: 175–194
3 Drury M R, Ural J. Deformation-related recrystallization processes. Tectonophysics, 1990, 172: 235–253
4 Stünitz H. Transition from fracturing to viscous flow in a naturally deformed metagabbro. In: Boland J N, Fitz Gerald J D, eds. Defects and Processes in the Solid State: Geoscience Applications. Amsterdam: Elsevier, 1993. 121–150
5 Berger A, Stünitz H. Deformation mechanisms and reaction of hornblende: Examples from the Bergell tonalite (Central Alps). Tectonophysics, 1996, 257: 149–174
6 De Meer S, Drury M R, De Bresser J H P, et al. Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Issues and New Developments in Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics. London: Geol Soc Spec Publ, 2002. 200
7 Kitamura K. Constraint of lattice-preferred orientation (LPO) on *Vp* anisotropy of amphibole-rich rocks. Geophys J Int, 2006, 165: 1058–1065
8 Díaz Azpiroz M, Lloyd G E, Fernández C. Development of lattice preferred orientation in clinoamphiboles deformed under low-pressure metamorphic conditions—A SEM/EBSD study of metabasites from the Aracena metamorphic belt (SW Spain). J Struct Geol, 2007, 29: 629–645.
9 Tatham D J, Lloyd G E, Butler R W H. Amphibole and lower crustal seismic properties. Earth Planet Sci Lett, 2008, 267: 118–128
10 Tullis J. Deformation of feldspars. In: Ribbe P H, ed. Reviews in Mineralogy—Feldspar Mineralogy. Mineral Soc Amer, 1983, 2: 297–323
11 Passchier W C, Trouw R A J. Microtectonics. Berlin: Springer, 2005. 60–61
12 Imon R, Okudaira T, Fujimoto A. Dissolution and precipitation processes in deformed amphibolites: An example from the ductile shear zone of the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. J Metamorph Geol, 2002, 20: 297–308
13 Imon R, Okudaira T, Kanagawa K. Development of shape- and lattice-preferred orientations of amphibole grains during initial cataclastic deformation and subsequent deformation by dissolution-precipitation creep in amphibolites from the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. J Struct Geol, 2004, 26: 793–805
14 Rooney T P, Riecker R E, Gavasci A T. Hornblende deformation features. Geology, 1975, 3: 364–366
15 Morrison-Smith D J. Transmission electron microscopy of experimentally deformed hornblende. Am Mineral, 1976, 61: 272–280
16 Dollinger G, Blacic J D. Deformation mechanisms in experimentally and naturally deformed amphiboles. Earth Planet Sci Lett, 1975, 26: 409–416
17 Biermann C. (100) deformation twins in naturally deformed amphiboles. Nature, 1981, 292: 821–823
18 Hacker B, Christie J M. Brittle/ductile and plastic/cataclastic transition in experimentally deformed and metamorphosed amphibolite. In: Duba A G, Durham W B, Handie J W, et al, eds. The Brittle-Ductile Transition in Rocks. AGU Geophys Monogr Ser, 1990, 56: 127–148
19 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 等. 主要造岩矿物的动态重结晶及其变质条件. 地学前缘. 2008, 15: 226–233
20 Boullier A M, Guéguen Y. SP-Mylonites: Origin of some mylonites by superplastic flow. Contrib Mineral Petrol, 1975, 50: 93–104
21 田永清. 五台山-恒山绿岩带地质及金的成矿作用. 太原: 山西科技出版社, 1991. 5–7
22 苗培森. 恒山中深变质岩区构造样式. 天津: 天津科学技术出版社, 2003, 5–30
23 王凯怡, 郝杰, Wilde S A, 等. 山西五台山-恒山地区晚太古-早元古代若干关键地质问题的再认识: 颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约. 地质科学, 2000, 35: 175–184
24 Wield S A. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Wutai Complex. In: Kröner A, Zhao G C, et al, eds. A Late Archaean to Paleoproterozoic Lower to Upper Crustal Section in the Hengshan-Wutaishan Area of North China. Guidebook for Penrose Conference Field Trip. Beijing:

Chinese Academy of Sciences, 2002. 32–34
25 郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 等. 恒山西段石榴石角闪岩和麻粒岩的变质作用、*PT* 轨迹及构造意义. 地质科学, 1999, 34: 311–325
26 Kaibysheva O A, Pshenichniuka A I, Astanin V V. Superplasticity resulting from cooperative grain boundary sliding. Acta Mater, 1998, 46: 4911–4916
27 Zelin M G, Krasilnikov N A, Valiev R Z, et al. On the microstructural aspects of the nonhomogeneity of superplastic deformation at the level of grain groups. Acta Mater, 1994, 42: 119–126
28 Schmid S M. Microfabric studies as indicators of deformation mechanisms and flow laws operative in mountain building. In: Hsu K J, ed. Mountain Building Processes. London: Academic Press, 1982. 95–110
29 Rutter E H, Casey M, Burlini L. Preferred crystallographic orientation development during the plastic and superplastic flow of calcite rocks. J Struct Geol, 1994, 16: 1431–1446
30 Boullier A M, Guéguen Y. Peridotite mylonite produced by superplastic flow. In: Snoke A, Tullis J, Todd V R, eds. Fault Related Rocks—A Photographic Atlas. New Jersey: Princeton University Press, 1998. 514–515
31 Hoshikuma A. Grain growth and superplasticity: Their implication to earth science. J Geol Soc JP, 1996, 102: 232–239
32 靳是琴, 李鸿超. 成因矿物学概论. 长春: 吉林大学出版社, 1986. 221–222
33 Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. Contrib Mineral Petrol, 1994, 116: 433–447
34 Anderson L A, Smith D R. The effects of temperature and f_{O_2} on the Al-in-hornblende barometer. Am Mineral, 1995, 80: 549–559
35 Gifkins R C. Grain boundary sliding and its accommodation during creep and superplasticity. Metall Mater Trans, 1976, 7A: 1225–1232
36 White J C, White S H. On the structure of grain boundaries in tectonics. Tectonophysics, 1981, 78: 613–628
37 Behrmann J H, Mainprice D. Deformation mechanisms in a high-temperature quartz feldspar mylonite: Evidence for superplastic flow in the lower continental crust. Tectonophysics, 1987, 140: 297–305
38 Tullis J, Dell'Angelo L, Yund R A. Ductile shear zones from brittle precursors in feldspathic rocks: The role of dynamic recrystallization. In: Hobbs B E, Heard H C, eds. Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies. AGU Geophys Monogr Ser, 1990, 56: 67–81
39 Flervoet T F, White S H. Quartz deformation in a very fine grained quartzo-feldspathic mylonite: A lack of evidence for dominant grain boundary sliding deformation. J Struct Geol, 1995, 17: 1095–1109
40 Fliervoet T F, White S H, Drury M R. Evidence for dominant grain-boundary sliding deformation in greenschist- and amphi-bolite-grade polymineralic ultramylonites from the Redbank Defor Maed Zone, Central Australia. J Struct Geol, 1997, 19: 1495–1520
41 Hanmer S. Matrix mosaics, brittle deformation, and elongate porphyroclasts: Granulite facies microstructures in the Striding-Athabasca mylonite zone, western Canada. J Struct Geol, 2000, 22: 947–967
42 Brodie K H. Retrogressive mylonitic metabasic fault rocks. In: Snoke A, Tullis J, Todd V R, eds. Fault Related Rocks—A Photographic Atlas. New Jersey: Princeton University Press, 1998. 402–403
43 Poirier J P. Creep of Crystals: High-Temperature Deformation Processes in Metals, Ceramics and Minerals. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 276
44 胡玲. 显微构造地质学概论. 北京: 地质出版社, 1998. 46–47
45 Vauchez A. Ribbon texture and deformation mechanisms of quartz in a mylonitized granite of Great Kabylia (Algeria). Tectonophysics, 1980, 67: 1–12
46 Behrmann J H. Crystal plasticity and superplasticity in quartzite: A natural example. Tectonophysics, 1985, 115: 101–129
47 Behrmann J H, Mainprice D. Deformation mechanisms in a high-temperature quartz-feldspar mylonite: Evidence for superplastic flow in the lower continental crust. Tectonophysics, 1987, 140: 297–305
48 Behrmann J H. Microstructure and fabric transition in calcite tectonics from the Sierra Alhamilla (Spain). Geol Rundsch, 1983, 72: 605–618
49 Allison I, Barnett R L, Kerrich R. Superplasitic flow and changes in crystal chemistry of feldspar. Tectonophysics, 1979, 53: T41–T46
50 Kleinschrodt R. Competing crystal-plastic and grain size sensitive deformation mechanisms in a peridotite from the Finero Complex (Ivrea Zone, NW-Italy). In: Bunge H J, Siegesmund S, Skrotzki W, et al, eds. Textures of Geological Materials. Oberured: DGM Informationsgesellschaft-Verlag, 1994. 201–219
51 Ashby M F, Verrall R A. Diffusion-accommodated flow and superplasticity. Acta Metall, 1973, 21: 149–163
52 罗震宇, 金振民. 岩石超塑性变形及其地球动力学意义综述. 地质科技情报. 2003, 22: 17–23