

花岗岩剪切变形与矿物成分变化的高温高压实验

刘 贵¹, 周永胜²

LIU Gui¹, ZHOU Yongsheng²

1. 中国地质科学院地质力学研究所/新构造运动与地质灾害实验室, 北京 100081;

2. 中国地震局地质研究所/地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences/Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Beijing 100081, China;

2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics/Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

摘要:在构造变形过程中,流体控制成矿作用的机制是目前世界矿床界共同面临的问题之一。通过研究剪切变形过程中的力学-化学作用,理解剪切构造应力和流体在构造成岩成矿过程中的行为与作用是解决这一科学问题的关键环节。在花岗岩高温高压剪切变形实验的基础上,分析了实验变形的矿物反应特征及矿物反应引起的化学成分变化,讨论了矿物反应与变形的相互影响。实验结果表明,变形样品中斜长石、钾长石和辉石以脆性-塑性变形为主,石英和云母以塑性变形为主。同时流体与岩石的相互作用引起了矿物间的反应,其中钾长石、辉石发生水解作用最典型。实验变形整体受应变局部化控制,随着剪切变形加强,脆性破裂逐渐形成和发展为裂隙,应力不断释放,有金属元素沿裂隙充填,这些微观特征在实验样品中普遍存在,类似野外中的矿脉。本次实验为韧性剪切带的流变行为、化学行为和剪切作用过程提供了实验数据。

关键词:成矿作用;构造;流体;剪切变形;高温高压

中图分类号:P588.12⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)11-1840-10

Liu G, Zhou Y S. An experimental study of shear deformation and mineral composition changes of granite under the condition of high temperature and high pressure. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1840-1849

Abstract: The fluid-controlling mineralization mechanism during tectonic deformation is a worldwide research focus. In order to comprehend the behavior and role of shear tectonic stress and fluids in the process of tectonic diagenesis and mineralization, it is the key to study the mechanical-chemical effects in the shear deformation process. In this study, the authors analyzed the distribution of mineral reaction and the change of chemical composition caused by the mineral reaction in experimental deformed granite samples under the condition of high temperature and high pressure and discussed interaction between mineral reactions and deformation. The results indicate that plagioclase, K-feldspar and pyroxene can endure brittle-plastic deformation, while most of the quartz and mica display plastic deformation. The hydrolysis of K-feldspar and pyroxene due to the fluid-rock interaction is the most characteristic reaction in the minerals. The strain localization dominantly controls the overall deformation in the experiment. With the strengthening of shear deformation, the brittle fracture gradually forms and develops into cracks. Thus the stress is released, and metal elements are filled along the cracks. These microscopic characteristics are common in the experimental samples, similar to features of the vein in the field. This experiment provides experimental data for the rheological behavior, chemical behavior and shearing process of the ductile shear zone.

Key words: dehydration reaction; melt; interaction between reaction and deformation; high temperature and pressure

韧性剪切带环境是流体的生成、运移和成矿的关键要素。在剪切应力作用下,韧性剪切带中的构造地质体、岩石或矿物遭受破坏,产生应变或变形,使物理、化学环境发生变化。依据非线性效应,常

收稿日期:2020-03-12;修订日期:2020-07-13

资助项目:国家自然科学基金项目《剪切变形过程中水-岩石相互作用的高温高压实验研究》(批准号:41972233)和地震动力学国家重点实验室开放基金《剪切变形与流体对花岗岩流变影响的高温高压实验研究》(编号:LED2017B04)

作者简介:刘贵(1982-),女,博士,副研究员,构造地质学专业。E-mail: hairyliu@163.com

通讯作者:周永胜(1969-),男,博士,研究员,从事高温高压岩石力学研究。E-mail: zhouyush@ies.ac.cn

产生岩石细粒化、压溶作用、流体作用、退变质作用、分异作用、构造分解、构造变质、蚀变等,它们对围岩中 Au 元素的活化具有十分重要的影响。如细粒化增强了岩石的活性与渗透性,为含矿流体提供通道;压溶作用是成矿物质 Au 元素活化析出的重要动力^[1]。韧性剪切动力可通过位错滑动、位错蠕变、扩散蠕变等晶格变形机制,促使矿物岩石内部变形、破裂,产生应力场和应变能,增加元素的地球化学活性和扩散速度,导致成矿流体的形成与运移、矿物元素的活化、搬运与沉淀富集^[2-3]。

构造作用驱动、控制着成矿流体运移和循环,而流体通过水-岩反应等反过来又影响构造作用的物理和化学效应,诱发新的流变或变形和新的矿化构造的产生^[4-14]。流体作为介质可以携带各种物质,使大部分构造发生变质,同时,流体在压溶、构造变质、构造变形,以及传递液压和润滑中起间接软化作用^[15-16],改变了岩石及矿物的变形特性,使岩石在较小的差异应力作用下,就能够变形。然而,迄今为止,在微观层面对于韧性剪切带中岩石流变与流体相关关系缺乏定量研究。鉴于此,前人提出岩石流变学的基本原理及在构造变形中的广泛应用,可为阐明成矿产物的富集机理和矿床的成因提供重要启示^[17]。构造物理化学将岩石流变学与构造地球化学结合起来^[18-21],把流变学基本理论纳入成矿学研究范畴,有可能理解构造应力作用在岩石矿物的形成、形变与相变过程中的作用,并揭示成矿元素的迁移、沉淀和富集机理^[17]。

部分学者根据已有的剪切成矿模式和剪切成矿的物理化学条件,对韧性剪切成矿作用进行了模拟实验研究。部分学者^[22-26]开展了高温高压成矿实验。随着实验温度、压力的增加,韧性剪切作用和成矿物质活化、迁移明显增强。高温高压条件下,剪切变形和构造应力作用会促使矿物元素的分异和迁移^[27-28]。这些高温高压实验表明,在一定的温度和压力条件下,在韧性剪切期间成矿是可能的。实验揭示了构造应力作用下岩石矿物的形成、形变与相变过程,但在解释构造应力与地壳物质(包括各种地质体、岩石、矿石、矿物、元素等)的变形、流体和成矿物质富集的机理方面并不让人信服^[17]。

本文通过细粒花岗岩在构造应力和流体作用条件下的实验,研究矿物成分的变化特征,从理论

上探讨天然强剪切应变条件下花岗岩在微观尺度上的组分迁移与应力(应变)变化的制约关系,为探讨构造应力和流体作用下元素迁移的规律、成矿地球化学作用提供理论和实验依据。

1 实验方法、条件与实验样品

1.1 实验设备

本次实验在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室的 3 GPa 熔融盐固体介质三轴高温高压实验系统上完成,实验设备、装样、实验方法参见刘贵等^[29-30]。实验装样方式在原来的基础上对圆柱形样品进行了改进。固体介质高温高压三轴压力容器装样方式如图 1 所示。

1.2 实验设计

Kohlstedt 等^[31]通过剪切变形的实验设计,发现剪切变形使橄榄石和玄武岩熔体沿条带定向分布,剪切变形加剧了玄武岩熔体和橄榄岩之间的分离作用(图 2-a)。Pec 等^[32-33]开展了类似的剪切变形实验,不仅模拟了糜棱岩的形成过程,而且发现在剪切变形过程中出现非晶化。这些实验为本次的实验设计提供了很好的思路。本次实验在预制断层带内放置实验样品,开展剪切变形实验(图 2-b)。为了增加实验的剪切应变变量,采取实验压缩方向与预制断层带内的实验样品呈 45° 角度。本次实验的实验设计参照同样的方式。

在细粒花岗岩样品上钻取岩心,加工抛光为直径 3 mm 的圆柱,将圆柱样品沿与轴向压缩方向呈 45° 夹角切成厚度为 1 mm 的切片,作为高温高压剪切实验样品(图 2-b)。选择细粒的辉长岩样品,钻取岩心也加工抛光为直径 3 mm 的圆柱,将圆柱样品沿与轴向压缩方向呈 45° 夹角切割成梯形样品,作为实验围岩(图 2-b)。样品的总长度控制在 6 mm 左右。

实验样品用 10% 的 NaCl 溶液在真空中浸泡 96 h,以达到水解弱化降低岩石变形温度和压力的目的。辉长岩作为实验的围岩样品,一方面确保围岩比实验样品花岗岩具有更高的强度;另一方面在高温流体作用下,通过辉长岩和花岗岩成分交换,可以加速辉长岩中的铁镁成分扩散到实验样品中,便于观察实验样品与围岩之间的矿物成分变化。

1.3 实验样品

实验样品选择细粒花岗岩,浅灰色,细粒结构,

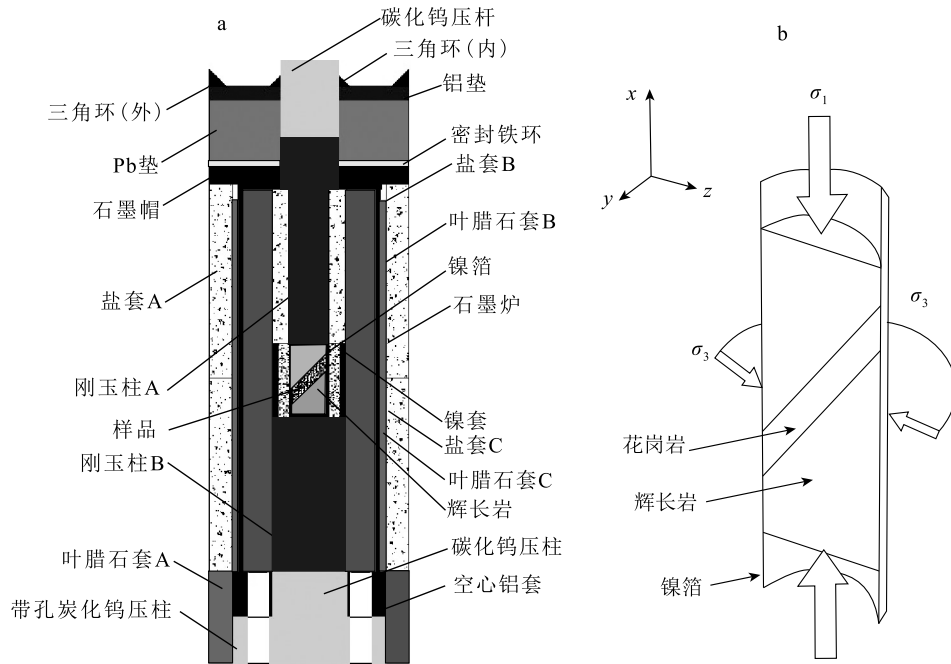


图1 实验装样结构图

Fig. 1 Sample assembly

a—装样结构剖面图;b—样品的3D几何图形

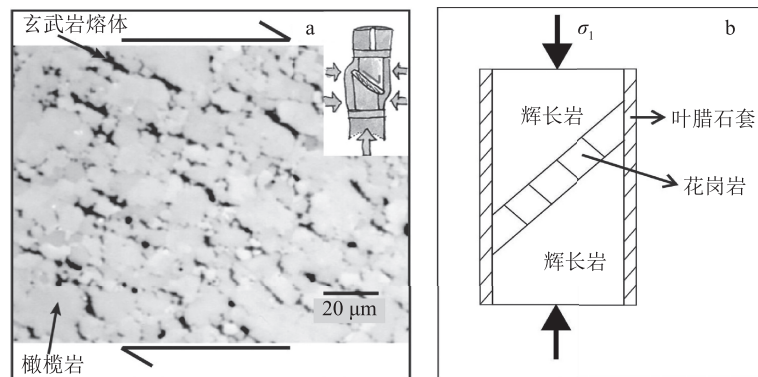


图2 实验装样设计

Fig. 2 Design of experimental sample

a—剪切变形后实验样品中的玄武岩熔体与橄榄岩产生了分离;

b—实验装样结构图(实验压缩方向与预制断层带内的花岗岩样品呈45°,围岩采用辉长岩样品)

块状构造,主要矿物为石英、钾长石和斜长石,次要矿物为黑云母、角闪石。其中石英具有波状消光,长石发育机械双晶。实验样品围岩为四川省攀西裂谷攀枝花钒钛磁铁矿底部边缘带的细粒辉长岩。辉长石呈细粒不等粒粒状结构,无明显各向异性,主要组成矿物为斜长石和单斜辉石,另有角闪石、磁铁矿、钛铁矿和绿泥石。2种样品的微观结构照片如图3所示。

2 实验结果

实验围压 800~1000 MPa,温度为 700℃、800℃、850℃,应变速率为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 。实验时间:每次实验从达到实验温度和压力后,实验样品的剪切变形时间为 6~8 d,使岩石与流体充分相互作用。本次成功实验有 9 组,9 组实验的温压条件、实验时间及应变变量如表 1 所示。

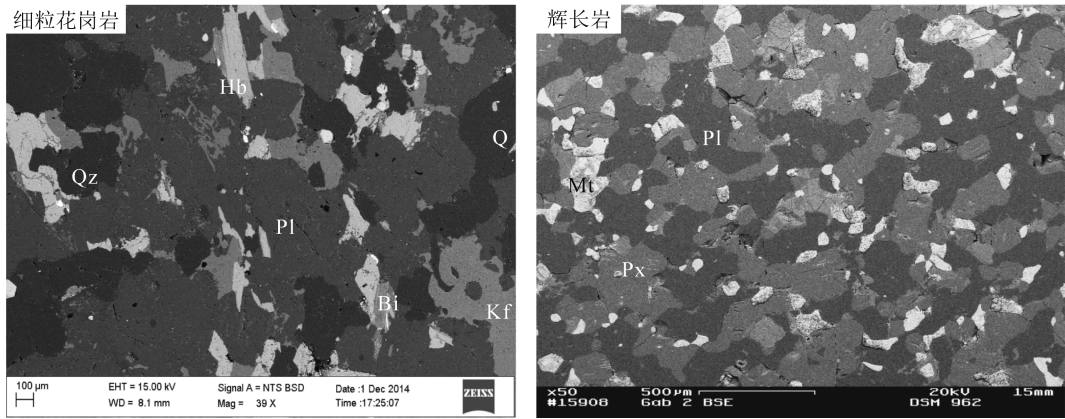


图 3 实验样品花岗岩和辉长岩的微观结构(扫描电镜照片)

Fig. 3 Microstructure of granite and gabbro samples(SEM)

Bi—黑云母;Hb—角闪石;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Mt—磁铁矿;Px—辉石

2.1 实验变形应力-应变曲线特征

为了得到样品变形真实的应力-应变曲线,对实验记录到的原始应力-应变曲线都经过了轴压摩擦力校正和面积校正。经过校正,最后得到的样品真实的应力-应变曲线(图 4)。在实验过程中,通常采用比较高的应变速率加载,进行排铅过程,然后应力应变曲线过了弹性形变过程后,将应变速率降低,使岩石在剪切应力作用下,充分与流体进行反应。应力应变曲线特征表明,岩石的强度在相同围压和温度条件下,随着应变速率减小,样品强度降低。

表 1 实验条件与力学参数
Table 1 Experimental conditions and mechanical data of samples

样品号	$T_1/^{\circ}\text{C}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$	压力/ MPa	差应力 /MPa	应变速 率/ s^{-1}	实验 时间/h	应变 量/%
S17-1	800	800	800	243.19	1×10^{-6}	85	14.5
S17-2	800	800	800	202.13	1×10^{-7}	104	31.2
S17-3	800	800	800	164.53	1×10^{-6}	98	33.1
S17-4	800	800	800	240.88	1×10^{-7}	82	17.8
S17-5	800	800	1000	190.94	1×10^{-6}	108	14.8
S17-7	800	720	1000	270.15	1×10^{-7}	139	15.1
S17-9	850	850	1000	/	1×10^{-7}	80	21.2
S17-10	700	705	1000	231.49	1×10^{-6}	121	23.7
S17-11	800	800	1000	281.23	1×10^{-7}	166	9.1

注: T_1 为主控热偶温度; T_2 为副控热偶温度; 主控热偶是控制实验温度的热偶, 而副控热偶主要是监控温度。实验的最后温度是主控热偶所显示的温度

例如 S17-1 与 S17-2 样品都在温度 800℃、围压 800 MPa 条件下, 应变速率为 $1\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 与 $1\times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 时的岩石强度分别为 243.19 MPa 和 202.13 MPa。其他实验结果基本具有同样的规律。

在剪切变形试验过程中, 实验花岗岩的样品厚度为 1 mm。在实验过程中要控制实验样品压缩变形的应变, 防止花岗岩样品在实验过程中应变过大, 使花岗岩样品的剪切变形量超过其厚度。

2.2 实验变形样品的微观结构特征

把实验变形样品沿压缩方向切开, 磨制成薄片, 在偏光显微镜和扫描电镜下分析样品的微观构造。在实验变形样品中, 普遍存在卸载阶段出现的张性破裂, 这在固体介质压力容器实验中是不可避免的。

实验样品(花岗岩和辉长岩)在剪切变形过程中出现显著变形, 且在接触边界, 辉长岩和花岗岩混在一起。其中, 斜长石和钾长石内见少量微破裂(图版 I-a), 其边缘部分发生塑性变形, 还有部分钾长石被剪切拉长(图版 I-c、d); 辉石以碎裂为主(图版 I-b), 局部边缘出现反应边, 显示塑性变形的特征(图版 I-e)。

花岗岩中石英-云母以塑性变形为主, 石英周边出现亚颗粒或剪切拉长为条带(图版 I-c、d)。在变形集中区, 云母强烈变形, 出现扭折, 被剪切拉长为云母条带(图版 I-f)。

所有实验都在差应力条件下完成。在实验过程中, 岩石局部破裂与塑性变形共存, 样品中斜长

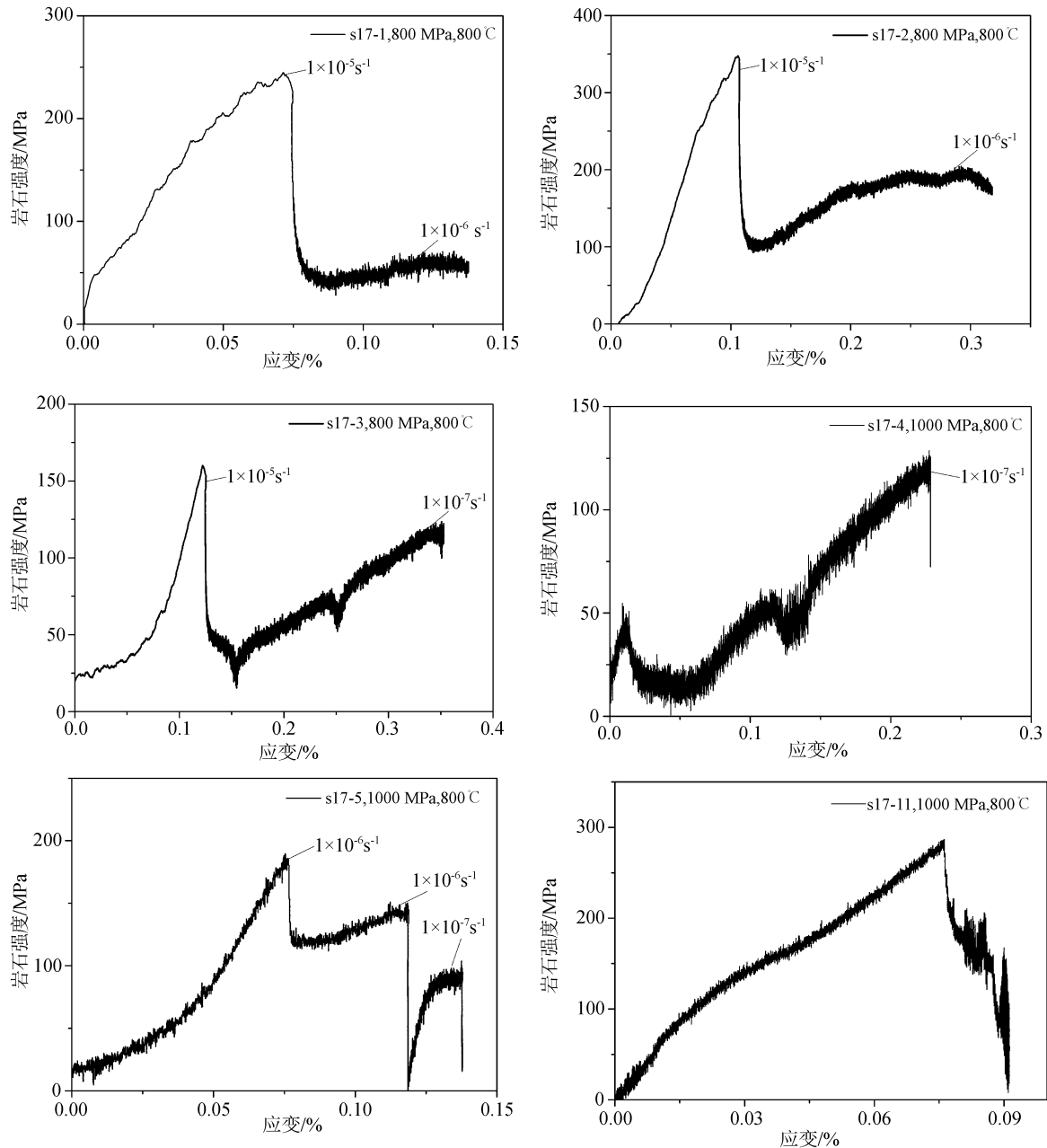


图4 实验样品的应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of experimentally deformed samples

石、钾长石和辉石以脆性破裂为主,矿物颗粒边缘发生塑性变形;而黑云母、角闪石与石英强烈拉长形成条带,以塑性变形为主,同时伴有黑云母和角闪石的脱水反应与熔融;辉石和钾长石伴有水解反应,局部含破裂。这些变形特征表明,样品以石英、黑云母、角闪石的塑性变形为主,长石和辉石以半脆性变形为主,整体样品的实验变形受原岩中的变形条带控制。

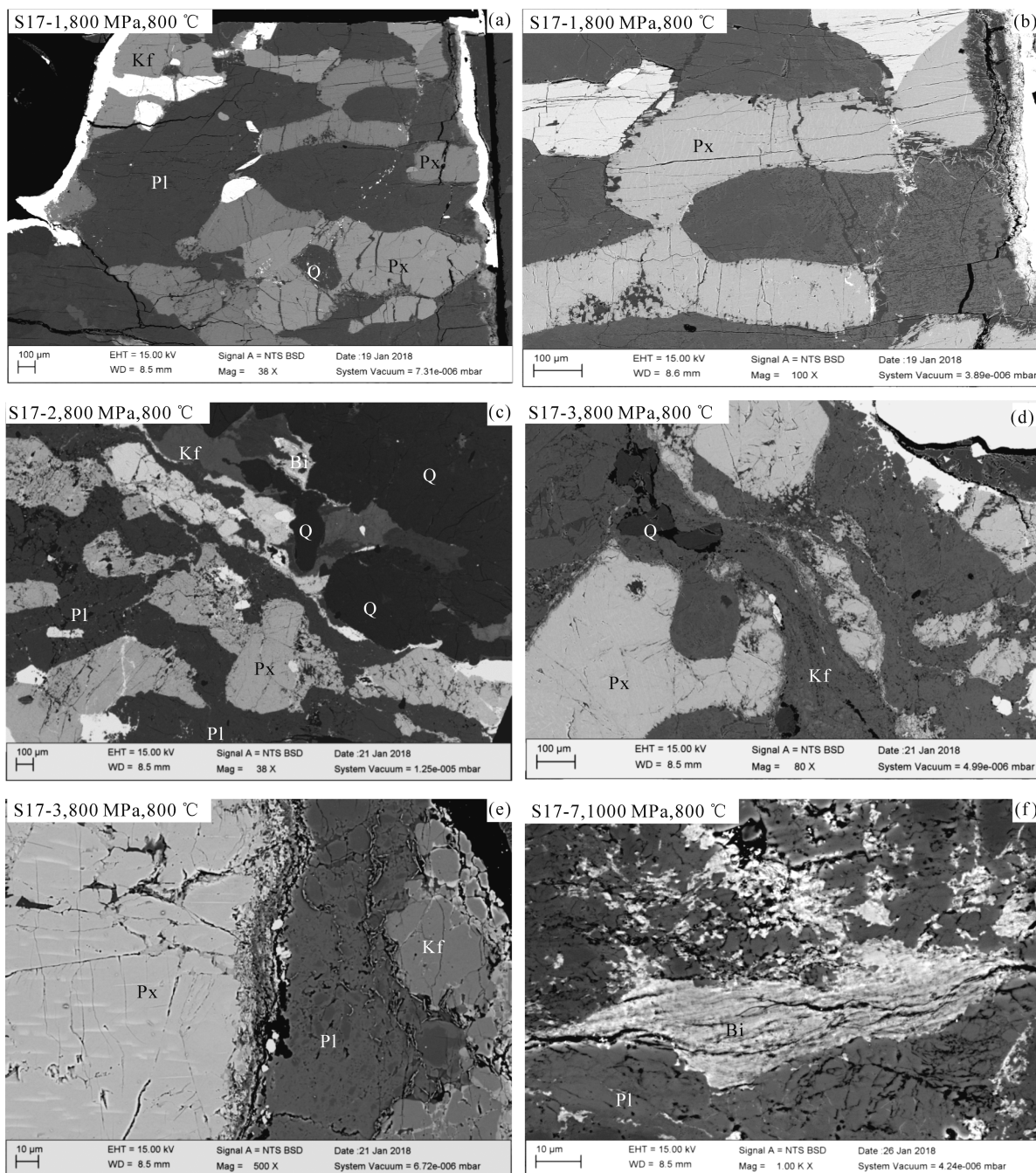
3 流体与岩石相互作用引起的矿物成分变化

3.1 实验样品的矿物间反应

实验变形的样品微观结构研究表明,实验变形后的样品在温度 700~850°C 时,钾长石、辉石等因水解作用发生了矿物分解,而云母英矿物发生了矿物反应,形成了针柱状矿物。

实验变形后,黑云母和角闪石伴有脱水反应,

图版 I Plate I



实验变形后样品的变形特征(扫描电镜照片): a.斜长石和钾长石矿物内的微破裂; b.辉石碎裂; c. d. 钾长石剪切拉长形成条带; e. 辉石边缘塑性变形, 与斜长石反应形成的反应边; f. 云母塑性变形被拉长为条带。Bi—黑云母; Q—石英; Kf—钾长石; Pl—斜长石; Px—辉石

石英颗粒出现剪切拉长条带, 在拉长拖尾处有重结晶颗粒。黑云母和绿泥石扭折拉长显著, 形成条带状, 局部因变形而弯曲, 呈镶嵌结构(图 5-a、b)。在黑云母条带中或其边缘分布有针状、细板柱状微晶, 局部含有熔体。黑云母边缘因脱水而出现暗化

现象, 脱水反应产物主要出现在黑云母条带边缘。高温条件下, 辉石、钾长石和斜长石与流体反应均出现了分解作用(图 5-a、c), 钾长石分解后的矿物成分发生改变, 尤其是钾长石分解反应边与钾长石核部的成分不同(图 5-c)。另外, 钾长石和斜长石

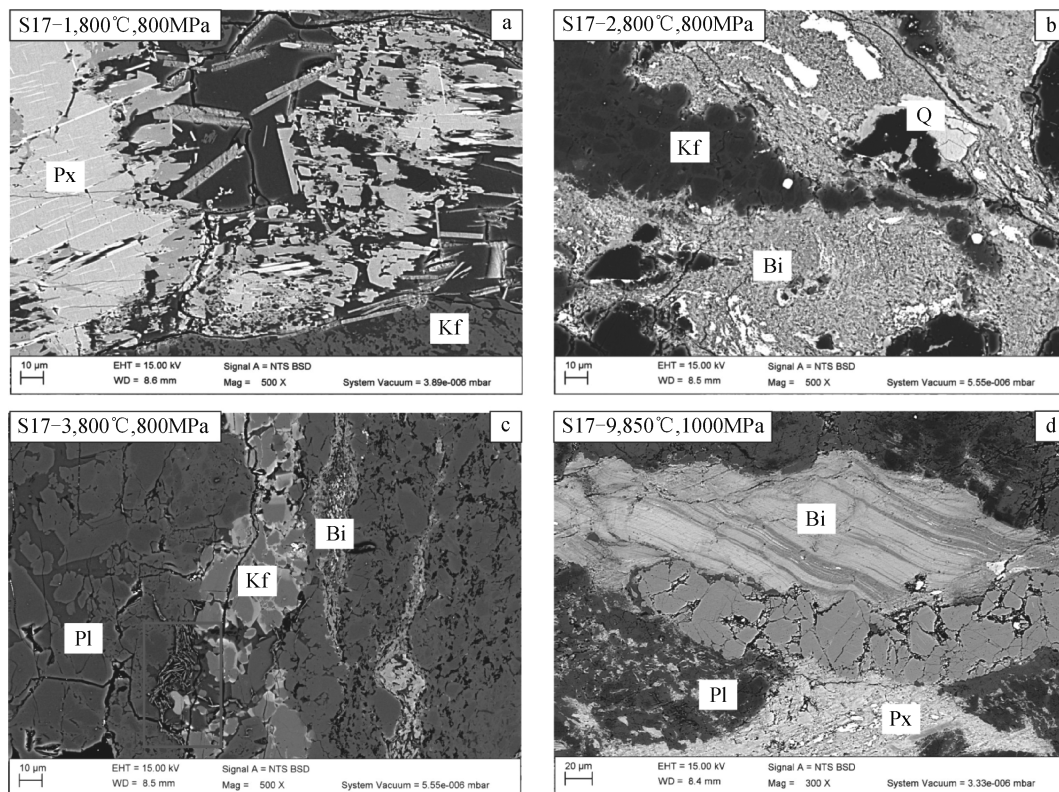


图5 实验变形样品中黑云母与辉石脱水反应和熔体的分布特征(扫描电镜照片)

Fig. 5 The dehydration reaction of biotite and pyroxene in deformed samples and distribution of melt under scanning electron microscopy (SEM)

a—辉石和钾长石的矿物水解反应,生成针柱状矿物;b—钾长石和黑云母的塑性变形;c—钾长石和斜长石的分解反应边,矿物颗粒之间生成针状矿物;d—黑云母条带中呈现暗色矿物富集,辉石发生水解作用。Bi—黑云母;Q—石英;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Px—辉石

矿物之间,图5-c中的灰色方框中有新生的针状矿物,这也是流体与岩石相互作用的明确证据。黑云母条带中的暗色矿物出现富集,辉石中金属元素也出现相对富集的现象(图5-d)。实验变形整体受应变局部化控制,表明在实验过程中,黑云母、绿泥石发生剪切变形拉长,部分出现脱水熔融,而斜长石、钾长石及辉石在流体作用下产生了水解作用。在整个实验过程中,流体与岩石相互作用导致成分变化,特别是金属元素富集和新的矿物出现。

3.2 实验后样品的矿物成分

通过扫描电镜与能谱面扫描方式分析得到的矿物与熔体成分分布表明,熔体成分主要来源于黑云母和角闪石脱水熔融,熔体成分普遍富铁镁,但熔体成分分布不均匀,受周围矿物成分影响,也受应变控制。

样品 S17-4 (800 MPa, 800°C) 中,钾长石高温条件下分解,形成熔体条带,其中熔体呈高 Si 高 Al

高 K,尤其是局部出现 Al、K 富集(图版 II)。熔体成分分析显示,在变形过程中,钾长石产生了高温分解,矿物成分发生了成分分异,充分表明了熔体成分分布不均匀。

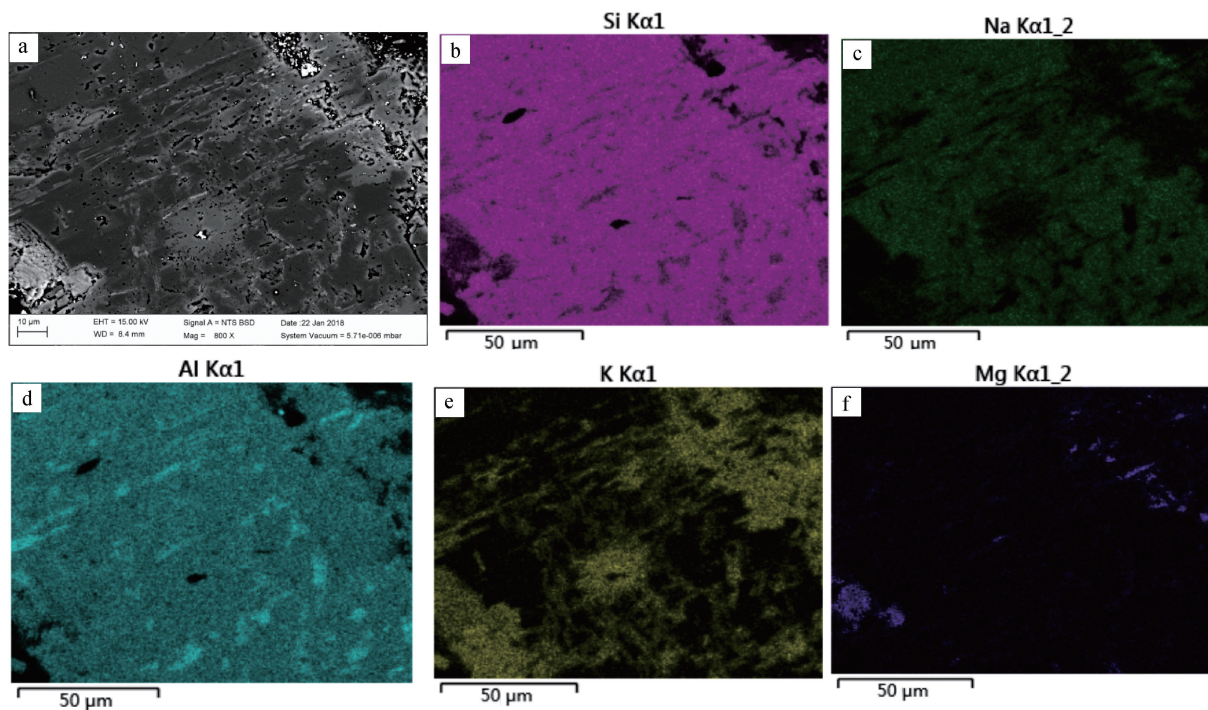
样品 S17-9 (800 MPa, 800°C) 中,在石英与斜长石之间的黑云母与磁铁矿发生脱水熔融,形成贫 Si、Al、Na、Ca,富 Mg、K、Fe、Ti 的熔体条带。并且在剪应变作用下,富钛熔体拉长成细长条带(图版 III)。

4 讨论

4.1 矿物脱水和矿物反应促进变形局部化

在高温条件下,强烈的局部化变形,一方面引起黑云母、辉石、角闪石和石英粒度减小,增加了矿物表面积,有利于脱水反应的进行;另一方面,应变晶体塑性变形引起矿物位错密度增加,促进了晶体内部成核和黑云母、角闪石、辉石及钾长石的脱水分解,同时也促进了微晶矿物的产生。Holyoke 等^[34]

图版 II Plate II



a~f. 钾长石高温分解后熔体成分分布图(实验样品 S17-4 中典型矿物成分的面扫描图, 颜色明亮的代表矿物成分富集, 颜色暗的代表矿物成分亏损, 其中高 Si、Al、K 矿物呈现富集, 尤其是局部出现 Al、K 出现条带状富集)

的实验表明, 在高应变低应力条件下, 样品中形成局部化的剪切带。随着应变增加, 样品在局部化的剪切带内出现反应物。这表明高应变促进矿物反应, 并有利于反应物的生成。其中, 黑云母的扭折可能会促进动态重结晶过程中矿物成核, 形成新的黑云母^[35-37]。黑云母的扭折可能是矿物反应物最初的成核位置, 一旦黑云母的动态重结晶开始, 反应物的成核可能发生在不同的位置, 不仅仅在黑云母矿物的边缘。

实验研究表明, 矿物反应生成的新矿物相抑制了矿物颗粒的增长, 促进了细粒矿物的稳态, 对稳态变形和岩石弱化具有显著的作用^[38]。在本次研究中, 受变形局部化的影响, 矿物反应出现在黑云母条带和辉石及钾长石的边缘。由于反应产物和熔体分布局限, 对岩石变形的影响主要体现在局部化的剪切带内。

4.2 微观变形特征对剪切带成矿的启示

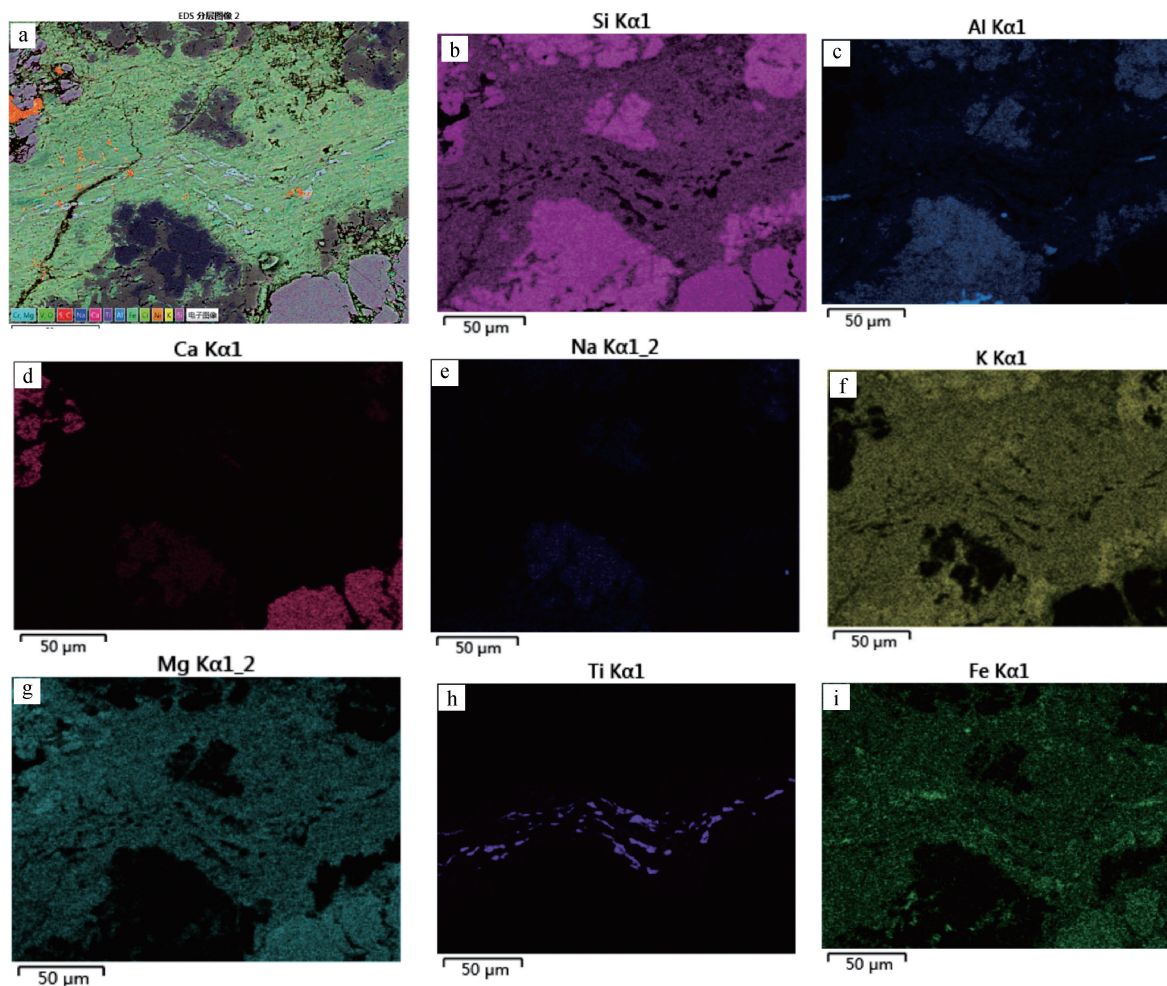
在剪切变形作用下形成的脆性破裂, 为矿物质沉淀和金属元素富集提供了特殊的场所, 也为自然条件下脆性裂隙中的矿脉形成提供了实验基础。

韧性剪切带内的变形呈多阶段性, 早期变形多为塑性或韧性变形, 随着韧性剪切作用的进行,

逐步向韧-脆性变形、脆性变形转化。在不同的变形阶段形成不同的微观构造。如在早期变形过程中, 矿物相没有发生变化, 只是在矿物结构、形态和颗粒大小方面发生变化。刘铁兵和曾庚栋^[39]通过岩石变形实验及对天然糜棱岩的研究表明, 岩石在不同温压条件下, 可形成不同的显微构造。如黑云母在绿片岩相条件下, 变形主要为简单开阔的扭折, 随着温压条件的升高, 扭折变尖、变窄, 在高绿片岩相条件下开始出现大量的重结晶现象。上述微观构造的出现及转变反映了一定的成矿环境及变形特征, 更重要的是, 在韧性剪切变形过程中, 常伴随着细粒化、压熔作用、流体作用、退变质作用、分异作用、构造分解、构造变质核蚀变等, 它们对成矿元素的活化、迁移、富集、沉淀等均有十分重要的影响。

在本次实验样品的微观构造分析中, 黑云母发生扭折变窄, 在其边缘发育针状、细板柱状微晶, 局部含熔体。黑云母和角闪石发生脱水反应, 辉石、钾长石和斜长石在高温条件发生水解反应, 钾长石分解后的矿物成分发生了改变, 尤其是钾长石分解反应边与钾长石核部的成分不同。这些微观的变形特征与天然条件下的成矿特征类似。

图版 III Plate III



a~i. 实验样品 S17-9 中典型矿物成分的面扫描图(颜色明亮的代表矿物成分富集,颜色暗的代表矿物成分亏损,其中 Si、Al、Na、Ca 相对亏损, Mg、K、Fe、Ti 相对富集形成熔体条带)

5 结 论

(1) 微观结构分析表明,实验变形后的花岗岩和辉长岩在剪切变形过程中都出现显著变形,并在接触边界 2 种岩石相互混在一起。其中,花岗岩中的石英-云母以塑性变形为主;斜长石-钾长石既有塑性变形,也有微破裂;辉石以碎裂为主,局部边缘有塑性变形。流体促进了塑性变形,局部出现流体压力较高时,能够引起流体导致的脆性破裂,为流体中含有的矿物质沉淀和金属元素富集提供了特殊的场所。

(2) 构造应力作用不仅能形成导矿通道和赋矿空间,同时可以使岩石中矿物组分发生变化,沿构造裂隙及其附近压应力降低的空间金属元素开始沉淀或富集。随着实验温度、压力的逐渐增高,韧

性剪切作用明显增强;随着剪切变形向脆性变形发展和裂隙的形成和发展,应力不断释放,伴随有金属元素沿裂隙充填。这些微观特征在实验样品中普遍存在,类似野外中的矿脉,说明韧性剪切变形向脆性剪切变形发展时,成矿系统由封闭向开放转变,成矿地球化学环境发生变化有利于金属元素的沉淀富集。

致谢:感谢审稿专家提出的建设性意见与建议,对提高论文质量有很大帮助。

参考文献

- [1] 付山岭,胡斌.从微观尺度探讨韧性剪切带型金矿的成矿模式[J].黄金科学技术,2010,18(2): 31-34.
- [2] Zhong Z Q, You Z D. Compositional variation and volume loss of a shear zone—Hetai shear zone as a case history [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(19): 1638-1641.

- [3] 王春增, 李晓峰, 易先奎. 江西金山金矿控矿韧性剪切带的递进变形成矿机理: 显微构造证据[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(2): 169-182.
- [4] Fyfe W S. Metamorphic fluids[J]. Earth Science Review, 1992, 32(1/2): 1-146.
- [5] Fyfe W S, Kerrich R. Fluids and thrusting[J]. Chemical Geology, 1985, 49(1/3): 353-362.
- [6] Koons P O, Craw D, Cox S C, et al. Fluid flow during active oblique convergence: A Southern Alps model from mechanical and geochemical observations[J]. Geology, 1998, 26(2): 159-162.
- [7] Sibson R H, Scott J. Stress-fault controls on the containment and release of overpressured fluids: Examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zealand[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13(1/5): 293-306.
- [8] Travé A, Calvet F, Sans M, et al. Fluid history related to the Alpine compression at the margin of the South-Pyrenean Foreland basin: the Eguix anticline[J]. Tectonophysics, 2000, 321(1): 73-102.
- [9] Ghisetti F, Kirschner D, Vezzani L. Tectonic controls on large-scale fluid circulation in the Apennines (Italy) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69: 533-537.
- [10] Craw D. Fluid flow at fault intersections in an active oblique collision zone, Southern Alps, New Zealand [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69: 523-526.
- [11] Craw D, Koons P O, Horton T, et al. Tectonically driven fluid flow and gold mineralization in active collisional orogenic belts: Comparison between New Zealand and western Himalaya [J]. Tectonophysics, 2002, 348(1): 135-153.
- [12] Robl J, Fritz H, Stüwe K, et al. Cyclic fluid infiltration in structurally controlled Ag-Pb-Cu occurrences (Schladming, Eastern Alps) [J]. Chemical Geology, 2004, 205(1/2): 17-36.
- [13] Bellot J P. Extensional deformation assisted by mineralized fluids within the brittle-ductile transition: Insights from the southwestern Massif Central, France[J]. Journal of Structural Geology, 2007, 29(2): 225-240.
- [14] 万天丰. 关于中国构造地质学研究中几个问题的探讨[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1441-1450.
- [15] Andrew H A, Geoffrey R C, Greg W. Synchronous advanced argillic alteration and deformation in a shear zone hosted magmatic hydrothermal Au-Ag deposit at the Temora Mine, new south Wales Australia[J]. Economic Geology, 1995, 90(6): 1570-1603.
- [16] Tullis J, Yund R, Farver J. Deformation enhanced fluid distribution in feldspar aggregates and implications for ductile shear zones [J]. Geology, 1996, 24(1): 63-66.
- [17] 许德如, 吴传军, 吕古贤, 等. 岩石流变原理在构造成矿研究中的应用——以 BIF 型富铁矿床为例[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 1: 93-109.
- [18] 吕古贤. 构造物理化学的研究与应用[J]. 中国地质, 1997, (10): 45-48.
- [19] 吕古贤. 构造物理化学的研究进展[J]. 科学通报, 2003, 48(2): 101.
- [20] 吕古贤. 构造动力成岩成矿和构造物理化学研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 962-980.
- [21] 吕古贤, 邓军, 李晓波, 等. 构造物理化学的思路、研究和问题[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1616-1626.
- [22] 岳石, 马瑞, 王子潮. 关于韧性变形与成矿作用的一些实验结果[J]. 地质找矿论丛, 1990, 5(4): 30-35.
- [23] 陈先兵. 花岗闪长斑岩高温高压实验及其成矿地质意义[J]. 地质科技情报, 1994, 13(1): 63-69.
- [24] 肖化云, 吴学益. 金山金矿田构造变形特征及其模拟实验[J]. 地质地球化学, 1997, (3): 80-86.
- [25] 吴学益, 尚精华, 张开平. 金山金矿构造控矿特征及其模拟实验[J]. 矿物学报, 2007, 27(2): 143-152.
- [26] 郑远川, 顾连兴, 汤晓茜, 等. 2009. 天然矿石中硫化物的同构造再活化实验研究[J]. 地质学报, 83(1): 31-42.
- [27] 陈柏林, 董法先, 李中坚. 矿物中元素迁移变化的高温高压实验研究[J]. 地质力学学报, 1998, 4(1): 72-77.
- [28] 陈正乐. 高温高压下成矿元素运移聚集模拟实验[J]. 地质力学学报, 1999, 2(2): 90-93.
- [29] 刘贵, 周永胜, 姚文明, 等. 组构对花岗岩片麻岩高温流变影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2332-2347.
- [30] Liu G, Zhou Y S, He C R, et al. Experimental study on effect of pre-existing fabric to deformation of foliated mylonite under high temperature and pressure[J]. Geological Journal, 2016, 51(1): 92-112.
- [31] Kohlstedt D L, Zimmerman M E, Mackwell S J. Stress-driven melt segregation in partially molten feldspathic rocks [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 9-19.
- [32] Pec M, Stünitz H, Heilbronner R. Semi-brittle deformation of granitoid gouges in shear experiments at elevated pressures and temperatures[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 38: 200-221.
- [33] Pec M, Stünitz H, Heilbronner R, et al. Semi-brittle flow of granitoid fault rocks in experiments[J]. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 2016, 121: 1677-1705.
- [34] Holyoke C W, Tullis J. The interaction between reaction and deformation: an experimental study using albite, plagioclase, quartz gneiss[J]. J. Geology, 2006, 24: 743-762.
- [35] Etheridge M A, Hobbs B E. Chemical and deformational controls on recrystallization of mica [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1974, 43: 111-124.
- [36] Bell T H. Syntectonic nucleation of new grains in deformed mica[J]. Tectonophysics, 1978, 51: 31-37.
- [37] Holyoke C W, Tullis J. Mechanisms of weak phase interconnection and the effects of phase strength contrast on fabric development [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28: 621-640.
- [38] Stünitz H, Tullis J. Weakening and strain localization produced by syn-deformational reaction of plagioclase [J]. Tectonophysics, 2001, 90: 136-148.
- [39] 刘铁兵, 曾庚栋. 山东蒙阴常马走滑式韧性剪切带控矿研究[J]. 地质与矿产, 2001, 37(1): 15-19.