

# 韧性剪切带内流体作用的研究<sup>\*</sup>

李晓峰 华仁民

(南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 南京 210093)

**主题词** 韧性剪切带 流体作用 构造物理化学 水-岩反应 质量平衡计算

**提 要** 韧性剪切带内的流体作用是一个复杂的构造物理化学过程和力学-化学的耦合过程。它不仅影响着岩石的变形机制, 促进变形构造的发生和发展, 而且影响着岩石的矿物组成及化学成分的变化。本文在综合评价现有研究成果的基础上认为, 岩石的成分变异和体积变化是韧性剪切带内流体作用研究的主要内容, 韧性剪切带内构造-流体演化历史、构造物理化学、岩石应变模式及其特征的研究是今后韧性剪切带内流体作用研究的发展方向 and 前沿领域。

自从80年代Ramsay提出韧性剪切带的概念, 特别是人们发现太古宙绿片岩相中金矿与韧性剪切带密切相关以来, 有关韧性剪切带内流体作用的研究便开始蓬勃兴起。研究发现: 与金矿化有关的韧性剪切带都发生过大量的流体运移和退变质作用<sup>[1~9]</sup>, 其中大多与绿片岩相变质作用有关。带内分布有大量水-岩作用产生的富水矿物<sup>[10~16]</sup>, 也就是说, 在变形期间韧性剪切带内流体作用非常普遍, 水-岩反应十分广泛。

韧性剪切带内的流体作用是一个复杂的构造物理化学过程, 也是一种自组织的过程<sup>[17]</sup>。它是在构造应力作用下, 以流体为媒介和作用剂, 致使岩石发生物理变化和化学变化并产生相互作用的一个过程。流体活动在变形岩石的体积损失、质量传输、变形构造以及变质分异的发生、发展中起着至关重要的作用。而构造应力怎样在成岩成矿及变质过程中影响化学平衡是尚未解决的基本理论问题<sup>[18]</sup>。与金矿化有关的韧性剪切带具有同构造蚀变的特征, 即应力作用与交代蚀变化学反应是同时进行的。剪切带内成矿物质的活化、迁移、富集和沉淀过程与流体作用息息相关。因此, 正确了解和认识韧性剪切带内的流体作用, 是解决该类型矿床“源、运、储”的关键因素, 对于寻找该类型矿床新的靶区也具有重要的指导意义。

## 1 韧性剪切带内的变质变形作用与流体作用

### 1.1 变形作用与变质作用

韧性剪切带内岩石的变形主要表现为塑性变形, 塑性变形的机制主要有粒间变形和粒内变形。粒间变形首先从矿物的细粒化开始, 其结果使岩石的粒度普遍减小, 细粒物质沿着剪切方向沟通, 形成由细粒物质组成的带。在岩石细粒化的过程中, 岩石的矿物颗粒产生粒间滑动。粒间滑动不仅使岩石的结构改变, 产生新的岩石结构, 而且还使岩石物质成分改

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点项目(49733120)资助。

第一作者简介 李晓峰, 男, 1971年生, 南京大学地球科学系矿物学、岩石学、矿床学专业博士生。

收稿日期 1999-11-03, 改回日期 2000-08-02

变,形成大多是层状硅酸盐的新矿物。这类矿物多具有易滑动的解理面或滑移面,使岩石变形易于发生。粒间滑动导致岩石中细粒化的矿物和易变形的矿物逐渐排列成层,难变形的矿物和粗粒矿物也逐渐排列成另一层,彼此构成相间排列的微层构造,在韧性剪切带中组成条带状、条纹状或条痕状构造。粒间滑动总是以细粒化和变形分层构造为基础发挥作用。在岩石发生粒间滑动变形的同时或者稍后,在应力作用下,岩石中的矿物也发生粒内滑动,发育变形双晶、扭折、变形纹、位错壁、位错墙等显微构造<sup>[19]</sup>。这些构造为含金流体的运移提供了有利的空间和通道。

韧性剪切带不仅是一条变形带,而且是一条变质带,与金矿化有关的韧性剪切带都发生退变质作用<sup>[13, 15, 20~23]</sup>。韧性剪切带内岩石变质作用的总趋势是产生易变形的矿物以抵消构造应力的影响。例如中、酸性岩及火山岩的绿泥石化、绢云母化、高岭土化等蚀变,都是使架状硅酸盐矿物变为层状硅酸盐矿物,使难变形的矿物变为易变形的矿物。这样,岩石的进一步变形会比初始变形更加容易。在韧性剪切带内,随着变形作用的加强构造变质作用也加强,也就是说,变形作用有利于变质作用的发生,这主要表现在变形作用为变质作用提供能量。在较低温度下,变质作用不易进行。但是变形强烈的矿物晶体,积蓄较多的应变能,破碎的晶体积蓄很多表面能。这些能量在变质反应中能够提供必需的活化能<sup>[19]</sup>。

## 1.2 变形变质作用与流体作用

韧性剪切带既是应变局部化带,又是流体渗滤和运移的通道<sup>[17]</sup>。研究表明:流体在压溶、构造变质、构造变形以及传递液压和润滑中起着间接软化作用<sup>[23~25]</sup>。应力是构造化学作用的主要驱动力,应力控制着物质迁移扩散的方向和场所,在构造剪应力的作用下,岩石的强度降低,物质的溶解速度加快。在变形过程中存在的应力梯度、应变梯度及应变速率梯度,诱发了晶体化学梯度,引起物质的溶解和迁移。流体作为介质可以携带各种物质,使大部分构造变质得以发生,同时,流体作为软化剂,改变了岩石及矿物的变形特性,使岩石在较小的差异应力的作用下,就能够发生变形。在变形过程中,流体的存在有利于溶液的迁移以及微破裂和重结晶作用的发生<sup>[26]</sup>;而岩石变形变质作用的结果使岩石产生分层构造,使矿物定向化、岩石面理化,这又为流体的运移提供了通道。笔者在研究江西金山金矿蚀变糜棱岩时发现,与金矿化有关的黄铁矿沿着绢云母形成的片理化方向迁移、沉淀。

Uwe Ring 在研究中—东非马拉维北部退化的角闪岩相剪切带时指出,糜棱带岩石的体积亏损可达 50%~60%,根据硅的亏损所计算出来的水/岩比达 200~400。剪切带的形成最初与黑云母、长石分别分解为夕线石和石英有关。高应变带中夕线石和石英的形成是糜棱岩化期间脱水反应、脱碱作用的结果,这两种作用导致了黑云母的分解。尽管这种脱水作用所产生的水与流经剪切带内流体的通量相比是微不足道的,但是夕线石/黑云母比与应变的关系表明由脱水作用所释放的水对石英的局部变形行为起着催化剂的作用。剪切带中的脱碱作用使得云母变得不稳定,阻碍了新生云母的形成。绝大多数黑云母的分解破坏了糜棱岩中流体循环的通道,最终导致了应变硬化和剪切活动的终止<sup>[27]</sup>,这从另一方面证实了流体对韧性剪切带内的变形变质作用的影响。

总之,韧性剪切带内流体作用是一个复杂的构造物理化学过程,也是一个动态的力学—化学的耦合过程。一方面,水—岩相互作用改变了矿物行为、矿物组合和化学反应速率,提高了岩石的韧性、溶液的迁移能力、矿物的微破裂和重结晶作用<sup>[6]</sup>,导致岩石变形的加剧<sup>[13]</sup>;另一方面,变形岩石的劈理化、S—C 面理和构造分异作用提高了流体的渠化作用强

度<sup>[5,6]</sup>。韧性变形变质作用的结果必然是使得剪切带内岩石面理化、矿物定向化、细粒化,在韧性剪切带发育的成熟阶段,发生退变质作用。韧性剪切带发育过程中的退变质作用或蚀变作用,特别是硅化、绿泥石化、黄铁矿化、绢云母化、铁白云石化,对金矿的成矿作用最为有利<sup>[4,6,10]</sup>。金的富集与沉淀与韧性剪切带内岩石变形程度或剪应变强度呈正相关关系<sup>[28]</sup>。岩石的持续变形可导致原来构造形态和性质的转换。如R-P构造系统中R面,持续变形不仅使其方位改变,而且还由于两侧的颗粒边界迁移而造成局部封闭,导致早期沉淀于其中的金难以迁出,从而造成单向迁移并成为储金构造<sup>[54]</sup>。

## 2 韧性剪切带内流体作用的研究内容及相关方法

韧性剪切带内岩石的物质组成和化学成分的变化是流体参与下发生的岩石变形变质作用的结果。因此,岩石成分变异和体积变化的研究成为韧性剪切带内流体作用研究的重要内容<sup>[6,7,29-31]</sup>。剪切带内岩石成分的变异与体积的变化不仅与原岩和流体的成分有关,而且也与剪切带形成的P-T条件(它控制着岩石的变形机制、元素的分配系数和矿物的稳定性)、应力状态有关。下面从两个方面探究韧性剪切带内岩石的成分变异和体积变化。

### 2.1 水/岩比研究

近年来关于韧性剪切带内的流体作用研究表明:剪切带内岩石物质成分的变异是流体作用下岩石变质变形作用的结果,它与通过剪切带中心的流体流量呈正相关关系<sup>[2,5,7,8]</sup>。剪切带内岩石的成分变异和体积亏损在很大程度上取决于流体与岩石相互作用的方式和流体的通量。O'Hara在研究美国北卡罗来纳推覆构造时,首先利用“水/岩石”比率来研究韧性剪切带内的流体<sup>[2]</sup>。后来人们发现利用水/岩比来研究剪切带内的流体有很大的局限性,不能正确地反映流体的流量和流体的作用方式,它存在许多缺点:①人们通常假设岩石是与纯H<sub>2</sub>O这样的流体反应的;②把岩石学和地球化学的研究结果直接输入地下水文模型,从而把流体的量当作一种通量,而使水/岩比具有一个错误的量纲单位;③它们没有包含流体流动方向的信息<sup>[32]</sup>。Ferry认为需要一个全新的理论和方法来研究流体-岩石的相互作用,于是他提出了流体的时间积分通量模式。该模式为流体流动和化学反应耦合的标准方程,它既包括了在多孔介质中流体的流动和化学反应,又为解释地壳流体系统中岩石的矿物学和地球化学数据提供了良好的方法。在这个模式中,若组分i的化学反应进度 $\xi > 0$ ,说明组分i由于水-岩反应从岩石中带出,是递进变质作用的化学反应特点,并且与流体向温度升高的方向运动有关(如脱水或脱碳酸反应);如果 $\xi < 0$ ,说明组分i由于水-岩反应从流体中带入岩石,是退变质作用的化学反应特点,并且与流体向温度降低的方向运动有关(如水化或碳酸盐化反应)<sup>[32]</sup>。

Selverstone在研究Tauern构造窗花岗闪长岩的剪切变形时,发现从剪切带中心到围岩的三个变形带,即石榴石-绿泥石-十字石片岩带岩石、黑云母-多硅白云母片岩带、黑云母-白云母-石榴石带岩石的体积亏损分别达60%、43%、12%;水/岩比分别为120:1、100:1和20:1。在540℃和1GPa条件下,沿流体的流动方向,变形带内流体的时间积分通量分别为 $1.6 \times 10^8 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $6.6 \times 10^8 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $7.9 \times 10^8 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ <sup>[5]</sup>。这说明了剪切带内岩石体积亏损与其中较大的水/岩比有关,元素的富集或亏损反映了与剪切事件有关的流体渠化作用的强度。

## 2.2 质量平衡计算研究

变形岩石的质量平衡计算是研究岩石成分变异和体积变化的有效手段。质量平衡计算应首先归功于 Gresens 提出的蚀变变形岩石的成分- 体积方程<sup>[33]</sup>, 假设某体系等体积变化或者变形期间某元素是不活动的, 利用单个成分等化学条件计算可以得到体积因子  $F_v$ , 当  $F_v > 1$ , 水- 岩反应与体积增大同步进行;  $F_v = 1$ , 水- 岩反应在等体积条件下进行;  $F_v < 1$ , 水- 岩反应与体积减少同步进行<sup>[34]</sup>。随后, Grant 在 Gresens 方程的基础上, 提出了等浓度曲线(isocon diagram) 方程<sup>[9]</sup>, Maclean 和 Kranidiotis 等国内外学者<sup>[2, 35, 36, 37]</sup>对质量平衡计算方法也进行了有益的探索。他们均认为在进行质量平衡计算时, 原岩和变形岩(蚀变岩)物质组分的浓度是必不可少的。然而由于原岩的不均匀性和计算方法的不同, 使得对同一韧性剪切带的流体作用研究却得出不同的结果<sup>[37]</sup>。相对来说, 在所有的质量平衡计算方法中, 邓海琳提出的质量平衡计算方法<sup>[37]</sup>考虑了诸如体积、密度、孔隙度、渗透率等因素, 比较适合于韧性剪切带内流体作用的研究。因为, 流体作用的结果不仅改变了岩石的体积和物质组成, 而且也改变了岩石的密度、孔隙度、渗透率等物理性质。流体作用中质量平衡计算的关键问题是不仅要确定不活动组分, 而且活动组分的迁移与富集规律必须要同韧性剪切带内宏观、微观的地质现象相吻合。

在进行变形岩石的质量平衡计算和“水/岩”比研究时, 不管是 Gresens 的成分- 体积方程, 还是 Grant 的等浓度曲线图解和 O'Hara 所提出的微量元素方法, 都必须确定不活动的组分, 才能进行物质组分迁移和流体流量的计算。然而, 上述研究都没有说明确定不活动组分的有效方法。所谓不活动组分, 就是指在韧性变形期间, 在岩石和流体相互作用时, 不易溶于流体相且不易被其携带运移的元素<sup>[38]</sup>。不活动组分的确定是进行韧性剪切带内流体作用及其与剪应变关系研究的关键。一些学者根据元素的性质, 人为地把  $Al_2O_3$  或  $CaO$  作为不活动的组分<sup>[6, 7, 29]</sup>; 还有一些学者根据等浓度图, 把能够 and 原点连接成一条直线的物质组分作为不活动组分<sup>[9, 31, 33]</sup>; 周永章提出了以水迁移系数小的 Ti 作为不活动组分, 但是没有给出寻找数学不变量的方法<sup>[39]</sup>。另外一些学者根据行为相近的元素在分离作用过程中具有相同的地球化学行为, 认为这些元素的比值更有利于作为不活动组分进行岩石的体积变化和成分变异研究<sup>[40, 41]</sup>。然而, 经过研究发现, 一些元素的比值(如  $K/Rb$ )即使在相同围岩的韧性剪切带中也表现出不同的性状, 可以是增加<sup>[42-44]</sup>, 可以是减少<sup>[45, 46]</sup>, 也可以不变<sup>[47]</sup>。由于存在众多因素影响不活动组分的确定, Ague 和 Bamgrtner 认为上述做法是不现实的, 并对此进行了强烈的抨击<sup>[48, 49]</sup>。Ague 等人认为不活动组分的确定应首先排除以下四种类型: ①在交代环境所含的矿物中明显富集的组分。例如, 如果岩石被热液石英脉切割, 那么 Si 是活动的, 不能作为不活动组分; ②在分析过程中浓度变化具有较大不确定性的组分; ③原岩中浓度具有较大变化的组分; ④挥发组分  $H_2O$  和  $CO_2$ 。他们认为确定不活动组分应考虑野外的地质构造背景、岩石学、热动力学、运动学、同位素和数学的限制性等问题, 并提出了基于 bootstrap 的不活动组分的确定方法<sup>[48]</sup>。

在理想化的韧性剪切带中, 岩石的变形为平面应变。若剪切带内岩石的体积发生变化, 则将导致在垂直剪切带边界方向上的扩容和压缩现象, 这时岩石的变形为压扁变形。因此, 可以通过韧性剪切带内流体作用中岩石的体积变化来探讨岩石当时所处的应变状态, 估算剪切带的总位移和物质的迁移行为。然而, 人们在研究这些问题时, 出现了意外。首先是 Strivatava 利用不同的方法研究了瑞典加里东推覆杂岩体中的剪应变与体积亏损的关系, 得

出了不同的结论<sup>[50]</sup>。几何分析方法研究表明, 随应变增大体积亏损也增大; 物质成分分析方法研究表明, 变形前后物质成分变化不大, 体积亏损也较小。其次是 Glazner 在研究加利福尼亚变质杂岩体中的韧性剪切带后, 发现岩石的应变为压缩应变<sup>[4]</sup>, 这与传统的韧性剪切带应变模式不符。这些问题的出现不仅与韧性剪切带内流体作用中物质组分迁移的机制和应变局部化有关, 而且也说明了韧性剪切带内流体作用的复杂性。

总之, 由于韧性剪切带内流体的性质、流体的作用方式和岩石的应变状态不同, 导致元素的迁移机制有所差别, 从而使元素的行为在不同的韧性剪切带内表现出较大的差异性。韧性剪切带内的流体作用不仅仅是一个水-岩反应的过程, 而且是一个力学-化学的耦合过程。岩石与流体的相互作用方式、流体的运移方式和岩石的构造物理化学环境的差别都有可能造成物质组分活动性的差别, 引起岩石成分变异和体积的变化。而进行岩石成分变异和体积变化要首先确定不活动组分。因此, 韧性剪切带内岩石成分变异和体积变化的研究应视具体的变形带而异, 应分别考察初糜棱岩带、糜棱岩带和超糜棱岩带中组分的活动性。笔者认为不活动组分的确定应建立在对成矿流体包裹体和韧性剪切带内矿物蚀变类型详细研究的基础之上, 并遵循以下原则: ①体系封闭原则。既要充分考虑所研究的组分之间的关系, 又要考虑到分析过程中所引起的质量和体积变化计算误差; ②整体性原则。即在确定不活动组分时, 既要考虑元素的行为, 也要考虑流体的成分和物理化学性质, 以及岩石当时的构造物理化学环境; ③客观实在性原则。即在不活动组分确定后, 所进行的岩石体积变化和成分变异的研究结果, 要能够充分体现在宏观和微观地质现象上。

### 3 韧性剪切带内流体作用研究的方向及展望

韧性剪切带内的流体作用已成为当前地质学家研究的热点问题。流体作用下韧性剪切带内的变形变质作用对成矿作用的控制已被广大学者所接受<sup>[6, 13, 21, 22]</sup>, 特别是剪切带中位错金<sup>[51]</sup>的发现更有力地说明了这个问题。韧性剪切带内大都渗透着流体, 存在着热、力学、化学和流体之间的耦合作用。因此, 可以说韧性剪切带内的流体作用是一个复杂的构造物理化学过程, 它影响岩石的变形特性和变质作用, 促进变形构造的发生、发展, 控制着成矿物质的活化、迁移和富集。但是, 由于韧性剪切带内水-岩反应的复杂性, 使得这一领域的研究至今尚未有新的突破, 而构造流体<sup>[52]</sup>和构造物理化学<sup>[18]</sup>等概念的提出, 为人们研究韧性剪切带内的流体作用提供了新的思路和研究方向, 它必将成为流体作用研究的全新领域, 这主要表现在以下几个方面:

#### (1) 韧性剪切带内构造-流体演化历史的研究

系统研究韧性剪切带内构造与流体之间的关系。在显微镜下将不同世代的包裹体分开, 利用激光拉曼探针测定不同世代流体包裹体的温度、压力、成分, 探讨流体的演化历史<sup>[15]</sup>。运用透射电子显微镜及扫描电镜研究韧性剪切带内岩石的变形机制和显微构造。

韧性剪切带型矿床的年代学研究。利用阴极发光等技术, 通过对流体包裹体面(FIP)的优选方位、成分、年代的测定<sup>[53]</sup>, 探讨韧性剪切带内矿床的形成、演化历史。

#### (2) 韧性剪切带内构造物理化学研究

韧性剪切带内流体作用与变质变形作用之间相互制约、相互平衡的关系, 以及流体作用下构造应力如何影响成岩成矿及变质相过程的化学平衡<sup>[18]</sup>的研究。

韧性剪切带内成矿构造物理化学模式及构造物理化学界面<sup>[18]</sup>的研究。主要通过典型矿床的构造岩石学和流体作用研究,提出韧性剪切带成矿的构造物理化学模式和矿质沉淀的构造物理化学界面。

### (3) 流体作用下岩石的应变模式及机理研究

利用几何分析方法、物质成分分析方法<sup>[50]</sup>和流体包裹体面(FIP)<sup>[53]</sup>等方法研究韧性剪切带内岩石的应变模式,探讨流体作用下韧性剪切带内岩石的应变模式及其特征。

### 参 考 文 献

- 1 Sinha A K, Hewitt D A, Rimstidt J D. Fluid interaction and element mobility in the development of ultramylonites. *Geology*, 1986, 14: 883~ 886.
- 2 O'Hara K D. Fluid flow and volume loss during mylonitization: An origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, U S A. *Tectonophysics*, 1988, 156: 21~ 36.
- 3 O'Hara K D. State of strain in mylonites from the western Blue Ridge province, southern Appalachians: The role of volume loss. *Journal of Structure Geology*, 1990, 12: 419~ 430.
- 4 Glazner A F, Bartley J M. Volume loss, fluid flow and the state of strain in extensional mylonites from the central Mojave Desert, California. *Journal of Structure Geology*, 1991, 13: 587~ 594.
- 5 Selverstone J, Morteani G, Staude J M. Fluid channelling during ductile shearing: transformation of granodiorite into aluminous schist in the Tauern Windows, Eastern Alps. *Journal of Metamorphic Geology*, 1991, 9: 419~ 431.
- 6 杨新岳, 谢国源, 李志纯. 变形过程中的流体-岩石作用和变形岩石质量平衡. *中国科学(B辑)*, 1995, 25: 329~ 336.
- 7 钟增球, 游振东. 剪切带的成分变异及体积亏损. *科学通报*, 1995, 40: 913~ 916.
- 8 O'Hara K, Blackburn W H. Volume loss model for trace element enrichment in mylonite. *Geology*, 1989, 17: 524~ 527.
- 9 Grant J A. The isocon diagram a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 1986, 81: 1976~ 1982.
- 10 张连昌, 曾章仁, 杨兴科, 等. 康古尔韧性剪切带型金矿构造地球化学特征. *贵金属地质*, 1997, 6: 13~ 21.
- 11 Wang G M, White S H. Gold mineralization in shear zones within a turbidite terrance, example from central Victoria, S. E. Australia. *Ore Geology Review*, 1993, 8: 163~ 188.
- 12 Streit J E, Cox S F. Fluid infiltration and volume changes during mid-crustal mylonite of Proterozoic granite, King Island, Tasmania. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16: 197~ 212.
- 13 张伯友, 张爱萍, 俞鸿年等. 浙江瓊山韧性剪切带退变质作用与金矿化的讨论. *地质找矿论丛*, 1992, 9: 1~ 9.
- 14 Beach A. Retrogressive metamorphic processes in shear zone with a special reference to the lewisian complex. *Journal of Structure Geology*, 1980, 2: 257~ 263.
- 15 卢焕章. 成矿流体. 北京: 科学出版社, 1997, 193~ 205.
- 16 孙岩, 徐士进, 刘德良, 等. 断裂构造地球化学导论. 北京: 科学出版社, 1998, 174~ 175.
- 17 钟增球. 剪切带的流体-岩石相互作用. *地学前缘*, 1996, 3(3~ 4): 209~ 215.
- 18 吕古贤. 构造物理化学基本问题与金成矿预测. *地球学报*, 1998, 19(2): 117~ 125.
- 19 刘瑞响. 显微构造地质学. 北京: 地质出版社, 1988, 31~ 131.
- 20 邵世才. 试论韧性剪切作用与金的成矿. *贵金属地质*, 1996, 5(2): 142~ 196.
- 21 林传勇, 何永年, 陈孝德, 等. 韧性剪切带与金矿化的关系. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(11): 1223~ 1232.
- 22 Alexander F M K, Jochen K, Meyer F M. Gold mineralization in high-grade metamorphic shear zone of the Renco mine, southern Zimbabwe. *Economic Geology*, 1998, 93: 587~ 601.
- 23 Andrew H A, Geoffrey R C, Greg W, *et al.* Synchronous advanced argillic alteration and deformation in a shear zone-hosted magmatic hydrothermal Au-Ag deposit at the Temora Mine, new south Wales, Australia. *Economic Geology*, 1995, 90: 1570~ 1603.
- 24 Hobbs B E. 地壳中的流体与岩石变形. *地质科技情报*, 1987, 6(1), 38~ 44.

- 25 Tullis J, Yund R, Farver J. Deformation-enhanced fluid distribution in feldspar aggregates and implications for ductile shear zones. *Geology*, 1996, 24(1), 63~ 66.
- 26 McCaig A M. Fluid-rock interaction in some shear zones from the Pyrenes. *Geology*, 1988, 867~ 870.
- 27 Uwe Ring. Volume loss, fluid flow, and coaxial versus noncoaxial deformation in retrograde, amphibolite facies shear zone, northern Malawi, east-central Africa. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111(1): 123~ 142.
- 28 胡受奚, 王鹤年, 等. 中国东部金矿地质学及地球化学. 北京: 科学出版社, 1998, 159~ 172.
- 29 曲晓明. 河台含金糜棱岩带形成过程中的体积变化-物质迁移与流体循环. *南京大学学报(自然科学版)*, 1996, 32(增刊): 23~ 27.
- 30 Condie K C, Sinha A K. Rare earth and other trace element mobility during mylonitization: a comparison of the Brevard and Hope Valley shear zones in the Appalachian Mountains, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14: 213~ 226.
- 31 Winchester J A, Max M D. Element mobility associated with syn-metamorphic shear zone near Scotchport, NW Mayo, Ireland. *Journal of Metamorphic Geology*, 1984, 2: 1~ 11.
- 32 Ferry J M, Dipple G M. Fluid flow, mineral reactions, and metasomatism. *Geology*, 1991, 19: 211~ 214.
- 33 Gresens R L. Composition-volume relationship of metasomatism. *Chemical Geology*, 1984, 2: 47~ 55.
- 34 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 剪切带构造-流体-成矿系统动力学模拟. *地学前缘*, 1999, 6(1): 115~ 127.
- 35 Maclean W H, Kranodiotis P. Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge Massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 1987, 82: 951~ 962.
- 36 周建波, 胡克, 申宁华, 等. 稀土元素在剪切带中的含量变异及变异机制——以胶东造山带北缘剪切带为例. *岩石矿物学杂志*, 1998, 7(1): 17~ 22.
- 37 邓海琳, 涂光炽, 等. 地球化学开放系统的质量平衡: I 理论. *矿物学报*, 1999, 19(2): 121~ 131.
- 38 解庆林, 马东升, 刘英俊. 蚀变岩中物质迁移的定量计算. *地质论评*, 1997, 43: 106~ 112.
- 39 周永章, 涂光炽, Chown E H, 等. 热液围岩蚀变过程中数学不变量的寻找及元素迁移的定量估计——以广东河台金矿田为例. *科学通报*, 1994, 39(11): 1026~ 1028.
- 40 Seifert K E, Chadima S A. Depletion of heavy REE in metamorphic minerals from Adirondack anorthosites. *Geology*, 1989, 17: 1004~ 1006.
- 41 Murray R W, Brink M R, Jones D L, *et al.* REE as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 1990, 18: 268~ 271.
- 42 Tobisch O T, Barton M D, Paterson S R. Fluid-enhanced deformation: transformation of granitoids to banded mylonites, Western Sierra Nevada, California and SE Australia. *Journal of Structure Geology*, 1991, 13: 1137~ 1156.
- 43 Kerrich A, Allison I, Barnett R I, *et al.* Microstructure and chemical transformations accompanying deformation of granite in a shear zone at Mierille, Switzerland. *Contribution to Mineralogy & Petrology*, 1980, 73: 221~ 242.
- 44 Bailey C M, Simpson C, de Page D G. Volume loss and tectonic flattening strain in granite mylonite from the Blue Ridge province, Central Appalachians. *Journal of Structure Geology*, 1994, 16: 1403~ 1416.
- 45 Etheridge M A, Cooper J A. Rb/Sr isotopic and geochemical evolution of a recrystallized shear zone at Broken Hill. *Contribution to Mineralogy & Petrology*, 1981, 78: 74~ 84.
- 46 Dickin A P. Evidence for limited REE leaching from the Rofina gneiss, Switzerland: a discussion of the paper by Vocke *et al.* (1987) *Contributions to mineralogy and petrology*, 1988, 99: 273~ 275.
- 47 Wayne D A, Sinha A K, Hewitt D A. Differential response of Zircon U-Pb isotopic systematic to metamorphism across a lithologic boundary: an example from the Hope Valley shear zone, SE Massachusetts. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1992, 109: 408~ 420.
- 48 Ague J J, Joost L M, van Haren. Assessing metasomatic mass and volume changes using the bootstrap with application to deep crustal hydrothermal alteration of marble. *Economic Geology*, 1996, 91: 1169~ 1182.
- 49 Baumgartner L P, Olsen S N. A least-squares approach to mass transport calculation using the isocon method. *Economic Geology*, 1995, 90: 1261~ 1270.
- 50 Strivasatava H B, Huldeston P. Drummond Earley III Strain and possible volume loss in a high-grade ductile shear zone. *Journal of Structure Geology*, 1995, 17(9): 1217~ 1231.

- 51 石火生, 卢华复, 孙承轅, 等. 石英位错墙中金的发现及其意义. 科学通报, 1993, 38(23): 2174~ 2176.
- 52 杨巍然, 杨文淮. 构造流体——一个新的研究领域. 地学前缘, 1996, 3(3~ 4): 124~ 130.
- 53 Lespinasse L. Are fluid inclusion planes useful in structural geology? Journal of Structural Geology, 1999, 21: 1237~ 1243.
- 54 石火生. 江西金山韧性剪切带的变形机制与成矿的关系研究: [博士学位论文]. 南京大学, 1997.

## A Study On Fluid Action in the Ductile Shear Zone: A Review

Li Xiaofeng, Hua Renmin

(State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Key word:** ductile shear zone; fluid action; tectonic physicochemistry; water\_rock interaction; mass balance calculation

### Abstract

The fluid action in the ductile shear zone is a complicated tectonic physicochemical process coupled with the mechanic and chemical process, and is also a self\_organizing process. It not only affects the deformation mechanism as well as mineral constituents and chemical components of rocks and accelerates the growth and development of deformation structure, but also controls the reactivation, migration, enrichment and precipitation of ore\_forming substances of gold deposits hosted in the ductile shear zone. Based on this review, authors indicate that the readjustment of mineralogical and chemical compositions and volume changes are the main research areas of the fluid action in ductile shear zone. The study on the fluid action in ductile shear zone will be carried out in the following aspects: evolution history of tectonic\_fluid, tectonic physicochemistry, and the strain model and its features.

## 致 谢

2000 年度, 许多地质学专家为本刊评审了稿件, 为本刊质量的提高做出了重要贡献。为此, 本刊编辑部向他们致以衷心的感谢!

这些专家有: (以汉语拼音为序)

白文吉 陈代璋 陈 丰 崔文元 丁悌平 范宏瑞 方金满 高 俊 和政军  
 郭立鹤 洪大卫 李天福 刘昌实 刘福来 刘若新 罗素琼 牟保磊 聂凤军  
 彭明生 乔秀夫 秦 善 曲晓明 沈上越 宋述光 孙传敏 汤集刚 万渝生  
 王立本 翁玲宝 吴良士 谢先德 许保良 徐庆生 薛纪越 杨建军 曾荣树  
 张鹏飞 张泽明 张招崇 郑 红 郑 轳 周健雄

《岩石矿物学杂志》编辑部