

韧性剪切带内的流体与岩石相互作用研究进展

刘 贵^{1,2}
LIU Gui^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 新构造运动与地质灾害实验室, 北京 100081
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Beijing 100081, China*

LIU G, 2020. Research progress of interaction of fluid with rock in the ductile shear zone [J]. Journal of Geomechanics, 26 (2): 175-186 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.017

Abstract: The jointly controlling mechanism of tectonic deformation process and fluid mineralization is one of the hot issues of mineral deposits. As a strain localization zone in the continental lithosphere, a large amount of fluid is generally permeated in the shear zone. In the ductile shear zone, the interaction between fluid and rock, the localization of its chemical and physical effects lead to chemical unbalances and component migrations of minerals, causing re-adjustment of chemical composition of rocks. The action of the fluid, the change of composition and volume in the shear zone, the deformation and mineralization simulation experiments in the shear zone are summarized and analyzed. The mechanical-chemical action during shear deformation and the behavior of shear structural stresses and fluids during the process of tectonogenesis are discussed. Therefore, comprehensive research on the influence of tectonic forces on temperature, petrophysical properties, geochemical phase balance, and coherent parameters of water-rock systems should be strengthened.

Key words: shear zone; fluid-rock interaction; compositional variation; volume loss; high temperature and high pressure

摘 要: 构造变形与流体联合控制成矿作用的机制是矿床学界关注的热点问题之一。作为大陆岩石圈中的应变局部化带, 剪切带中一般都渗透着大量流体, 流体与岩石的相互作用及其化学效应和物理效应, 导致了矿物化学不平衡和组分的迁移, 引起岩石化学成分重新调整。文章通过对韧性剪切带内的流体作用、剪切带内的成分与体积变化、剪切变形与成矿模拟实验总结, 讨论了剪切变形过程中的力学-化学作用、剪切构造应力和流体在构造成岩成矿过程中的行为。因此, 要加强构造应力对温度、岩石物理性质、地球化学相平衡和水岩体系的相关参量方面影响的综合研究。

关键词: 剪切带; 流体-岩石相互作用; 成分分异; 体积亏损; 高温高压;

中图分类号: P613 **文献标识码:** A

0 引言

剪切带是研究大陆岩石圈及造山带的结构、

演化过程和动力学机制的窗口。作为大陆岩石圈中的应变软化带和局部化带, 剪切带中大都渗透着流体, 存在着热、力学、化学和流体之间的耦

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目 (41972233); 地震动力学国家重点实验室开放基金 (LED2017B04); 中国地质调查局项目 (DD20190319, 20190505)

第一作者简介: 刘贵 (1982-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事显微构造和高温高压岩石力学研究。E-mail: hairylife@163.com

收稿日期: 2019-12-12; **修回日期:** 2020-03-04; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 刘贵, 2020. 韧性剪切带内的流体与岩石相互作用研究进展 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 175-186 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.02.017

合作用 (O'Hara, 1994), 是研究流体-岩石相互作用的良好天然实验室。所谓流体指具有流动特性的地质体。岩浆与水是岩石圈中重要的液体类型, 地质历史中的岩浆与水汽流体可以流体包裹体与岩石的形式保存下来 (徐兴旺等, 2019)。剪切带流体系指在剪切作用过程中形成的流体及积极参与剪切作用的流体 (杨巍然和张文淮, 1996)。在韧性剪切带内矿床的形成过程中, 构造与流体是基本控制因素, 其相互作用过程实质上是成矿物质的活化、迁移、聚集定位。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 (Allibone et al., 1995)。构造作用驱动和控制着成矿流体的运移和循环, 而流体通过水-岩反应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 (Sibson and Scott., 1998; Koons et al., 1998; Ghisetti et al., 2000; Robl et al., 2004; Bellot, 2007; 万天丰, 2008)。

剪切带的变形行为是各种因素的综合效应, 包括剪切带发育的温压条件、流变学域、原岩组成和变形机制, 以及在剪切带中活动的流体形式、流体成分、流体流动或循环方式和流体的通量等。大量研究成果和实验数据表明: 韧性剪切带型或造山型金矿的形成, 实质上是岩石矿物、成矿元素的流变行为结果 (孙胜龙, 1995; 杨晓勇, 2005; Lawley et al., 2013)。岩石流变学的基本原理在构造变形中的广泛应用, 可能为阐明成矿物质的富集机理和矿床的成因提供重要启示 (许德如等, 2015)。而构造物理化学将岩石流变学与构造地球化学结合起来 (吕古贤, 1997, 2003, 2019; 吕古贤等, 2006), 把流变学基本理论纳入成矿学研究范畴, 从而有可能正确理解构造应力作用在岩石矿物的形成、形变与相变过程中, 成矿元素的迁移、沉淀和富集的机理。综合研究这些作用因素及其耦合作用, 可以更好地理解大陆岩石圈, 尤其不同结构层次岩石的流变行为和流变机制, 探讨岩石圈中物质的迁移循环作用, 研究物质相变与形变之间的关系, 为分析大陆岩石圈的结构及动力学过程, 揭示剪切带的成矿机理等提供有意义的信息 (钟增球和游振东, 1995)。

大多数研究者强调韧性剪切作用对成矿的重要性, 但很少从构造地球化学的角度探讨动力变形中的力学-化学作用, 以及构造岩流体活动对成

矿的制约作用。通过总结韧性剪切带中流体与岩石的相互作用的研究, 结合国内外相关研究的进展, 文章对如何理解剪切带内流体和剪切构造应力在构造成矿过程中的行为与作用, 以及正确运用岩石流变学原理分析矿床成因的问题进行概要论述。

1 韧性剪切带内的流体作用与力学机制

韧性剪切带内流体作用是一个复杂的构造物理化学过程, 其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 (张伯友等, 1992; 林传勇等, 1994; 杨新岳等, 1995; Kisters et al., 1998; 李晓峰和华仁民, 2000)。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, 不仅可以降低岩石的强度, 而且这种蚀变作用是流体与岩石反应的最直接证据, 对金属元素富集和成矿作用起到非常重要的作用 (Glazner and Bartley, 1991; 张连昌等, 1997; 刘忠明等, 2001)。一般来说, 流体与成矿作用之间有非常密切的关系, 这是因为热液流体对金属元素的迁移和富集有重要影响 (Hedenquist and Lowenstern, 1994)。事实上, 很多学者也都是从流体角度对成矿过程和成矿机制进行研究的 (Audétat et al., 1998; 胡瑞忠等, 2014; 陈随海等, 2016)。金属成矿的实质是岩石中原始分散元素, 借助多种水岩反应在成矿流体中逐渐浓集, 在适当部位沉淀形成矿石的全过程。

Phillips (1972) 指出, 流体压力的升高会引起以下变化: ①降低有效正应力, 差应力会增加 (图 1a); ②降低主应力值, 应力摩尔圆向左漂移逐渐接近摩尔破裂线 (图 1b); ③降低岩石破裂所需的差应力, 从而使岩石发生破裂。所以当流体压力达到一定值时 (如 $P_f \geq \sigma_3 + T$, 摩尔圆与摩尔包络线相切, 其中 σ_3 为最小主应力, 垂直方向; T 为岩石的抗张强度), 岩石发生水压致裂, 导致脆性破裂的产生。断层阀模式认为, 水压致裂还伴随剪应力的释放、剪切带的滑动、断层脉 (图 1c 中的剪切脉) 的形成以及地震的发生 (图 2, Sibson and Scott, 1998)。此时, 裂隙中流体压力

瞬间降低，流体中的成矿物质发生沉淀，矿物的沉淀充填则使裂隙快速愈合，附近流体也会在压

力差驱动下进入裂隙之中，从而使流体压力和剪应力再次积聚，重复上述过程（图 1c、1d）。

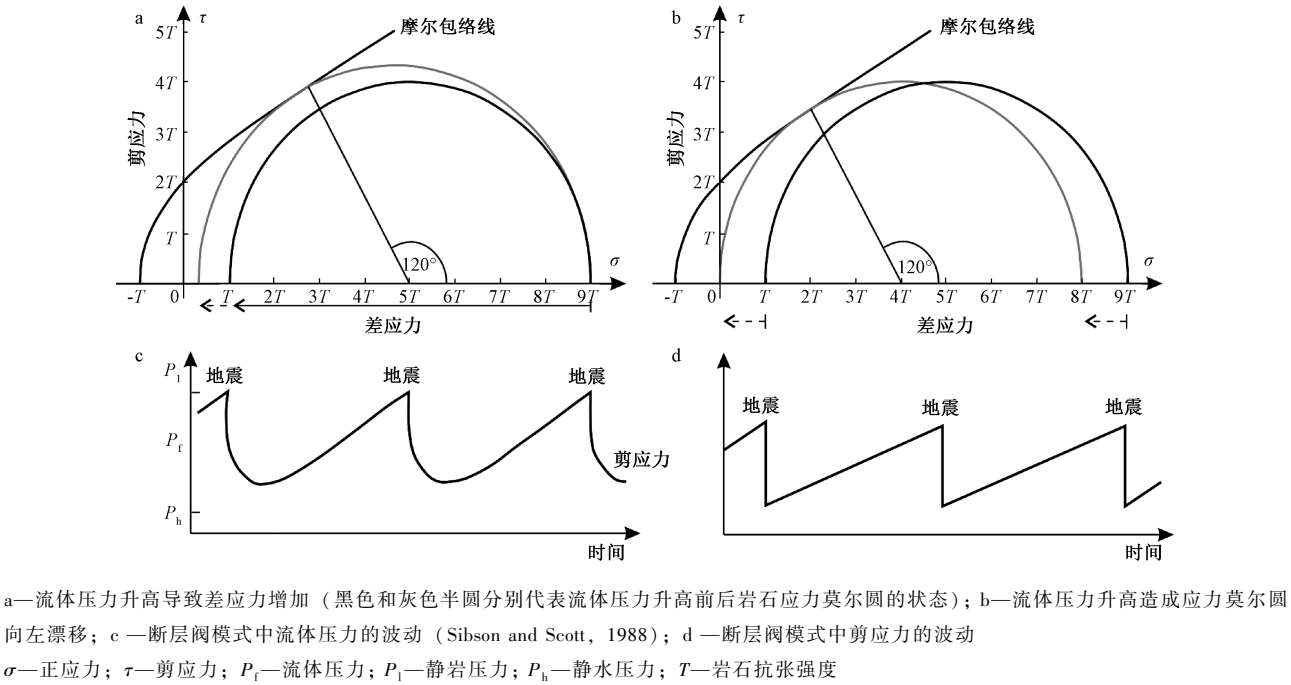


图 1 水力压裂摩尔图解及断层阀模式中流体压力和剪应力的波动 (Phillips, 1972)

Fig. 1 Mohr diagrams of hydraulic fracturing and the fluctuation of fluid pressure and shear stress in fault-valve mode (after Phillips, 1972)

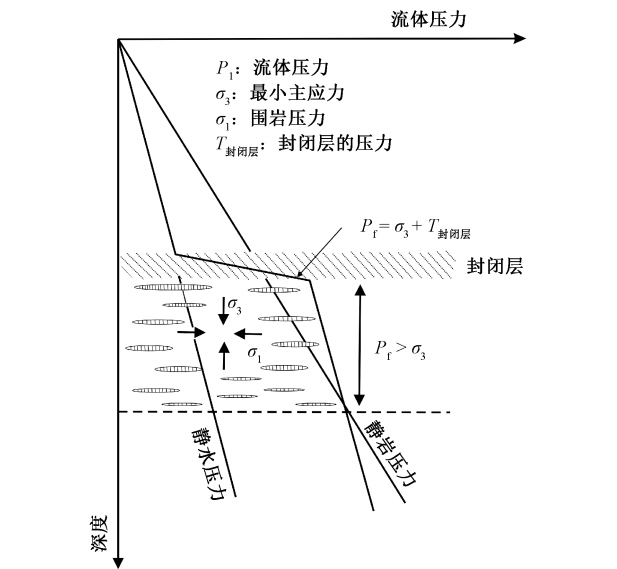


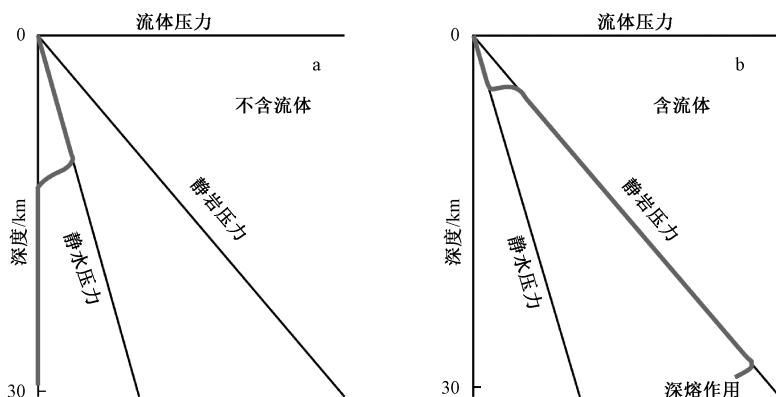
图 2 流体对裂隙的发育的影响，矿物的沉淀充填裂隙 (Sibson and Scott, 1998)

Fig. 2 Diagram showing the effect of fluid on the development of fissures, the filling of fracture by mineral precipitation (after Sibson and Scott, 1998)

Weatherley and Henley (2013) 通过活塞模型，计算出 4 级地震期间流体压力会瞬间从 290 MPa 下

降到 0.2 MPa。由于流体充填裂隙压力重新恢复，很小的破裂也会使流体压力发生明显下降。这些数据均显示流体压力发生过剧烈的波动，当剪切带中破裂张开瞬间，对流体的物理化学性质产生了重要影响。

地壳内的流体含量可能不尽相同，但在地壳浅部，一般都认为存在接近静水压的流体，而深部地壳大致可以分为两种端元模型 (Yardley and Valley, 1997)：在不含流体条件下，地壳浅部形成静水压力，随着深度增加，岩石发生麻粒岩相变质作用，岩石中基本不能形成流体压力，因此流体压力接近于零 (图 3a)。在含流体的条件下，地壳浅部形成静水压力；随着地壳深度增加，岩石发生韧性变形，愈合了岩石中的裂隙和孔隙，由于深熔作用，流体压力逐渐增加，最大可达到静岩压力 (图 3b)。当流体压力接近静岩压力时，岩石发生脆性破裂。在韧性变形基础上，叠加脆性变形，在高温热液作用下，在脆韧性转化带内形成矿床。而韧性剪切带型金矿是金矿产的主要来源之一，这种矿床的富集作用通常在 10~15 km (邱小平, 1999)，而在该构造层次，脆、韧性变



a—干地壳模型；b—水饱和地壳模型（灰色曲线代表的是流体压力）

图3 流体压力随深度的变化

Fig. 3 Variation of fluid pressure with depth

形共存、地震活动频繁、流体作用活跃、水压致裂过程普遍，更易于应力集中及脆性破裂的产生，为成矿作用提供了有利条件。

剪切带的发育为流体运移提供了通道，如区域性韧性剪切带常具有延伸较远较深、多次长期活动的特点，成矿流体往往沿剪切带迁移，从而使来自深部的成矿物质能够沿剪切带向浅部运移。对于韧性剪切带与金矿在空间上的密切关系，虽然已经有了相对统一的认识，但在成矿物质和成矿流体的来源上仍旧有较大的争议。

2 构造动力与成矿

构造动力成矿过程是能量积累、释放和转化过程。构造应力不仅影响或制约了一些成矿元素的演化行为，同时也可能直接参与成矿。在变形过程中存在的应力梯度和应变梯度诱发了晶体化学梯度，引起物质的溶解和迁移，即通过构造动力对环境物理化学条件施以影响，从而控制、制约成矿元素地球化学变化过程（李志伟和田敏，2015）。在这一过程中，构造动力成矿作用方式主要反映在构造动力对成矿元素的活化，以及矿液的运移和沉淀等方面。在构造动力作用过程中，在挤压、拉张、剪切条件下，必然引起应力场和应变能或变形能的产生以及热能的增长，导致岩石或矿物从表面到内部的宏观的和微观的改变——断裂、变形和组分传输。王子潮和王亚南（1987）从构造变形角度探讨热液成矿条件时，认为矿液运移的动力源主要来自成矿期构造应力场及其构造应力，决定矿液运移的主要因素是构造变形过

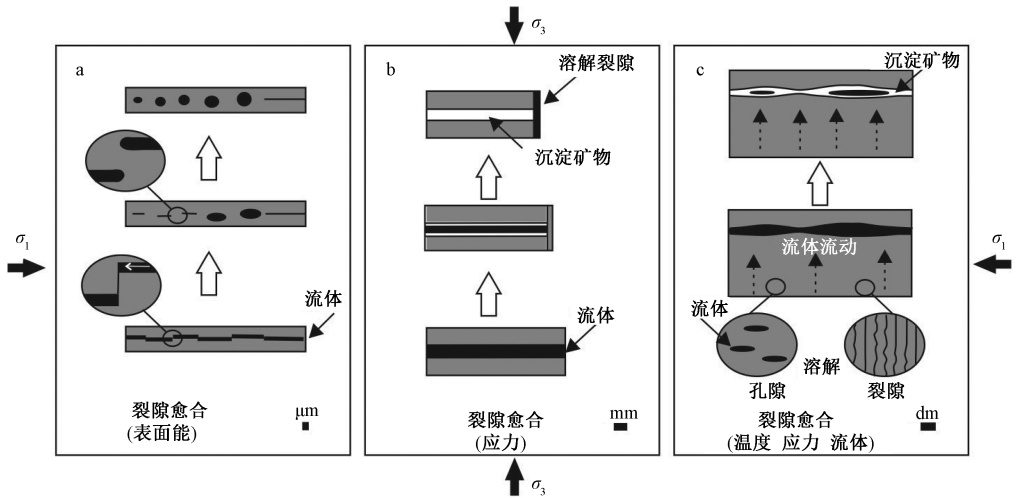
程中的减压作用。

在构造剪应力的作用下，岩石发生变形，物质溶解与沉淀速度加快（图4）。在剪切变形作用下，随着时间的增长，裂隙愈合伴随着矿物的溶解和沉淀（图4a）；在压溶蠕变机制下，在应力驱动下物质迁移形成溶解-沉淀（图4b）；在断层浅部，流体随着其高压消失而向上排出，原先溶解于高压流体中的矿物质（岩盐、方解石、石英等）在裂隙中析出结晶，形成脉体，愈合了断层带中的裂隙（Whitmeyer and wintsch, 2005; Gratier et al., 2009）（图4c）。上升通道中的许多含矿流体在进入中部地壳后，相应的物理环境变化促进化学反应发生，成矿物质卸载，广泛发育成矿作用。

韧性剪切构造应力能通过矿物的位错滑动、位错蠕变及扩散蠕变等变形机制，促使矿物岩石内部变形、破裂，产生应力场和应变，增加元素的地球化学活性和扩散速度，进而导致成矿流体的形成与运移、金的活化、搬运与沉淀富集（Zhong and You, 1995; 王春增等，2009）。

尽管韧性剪切带型成矿作用的研究取得了很多进展，但仍然存在一些有争议性的问题：①构造应力作用和流体在成矿元素的迁移和富集中分别起到什么作用；②不同构造变形条件下（韧性变形、脆韧性转化和脆性变形）成矿元素迁移富集规律如何；③成矿物质来源及其迁移富集过程是怎样的。

岩石的变形取决于其所受的温度及压应力条件等因素，在岩石变形的不同阶段形成各种微观构造。在深部高温条件下，岩石发生韧性变形过



a—微裂隙的自愈合；b—压溶扩散的物质迁移；c—局部区域流体的沉淀作用

σ_1 —围岩应力； σ_3 —最小主应力；空心箭头所指方向为时间增长方向；横截面垂直于破裂方向，灰色代表主岩，黑色代表流体相，白色代表沉淀矿物

图 4 裂隙愈合的各种机制 (Gratier et al., 2009; 张媛媛和周永胜, 2012)

Fig. 4 Various mechanisms of fracture healing (after Gratier et al., 2009; Zhang and Zhou, 2012)

程中，常伴随着细粒化，压溶作用、流体作用、退变质作用、分异作用、构造分解、构造变质和蚀变等，它们对成矿元素的活化、迁移、富集及沉淀等有十分重要的影响（付山岭和胡斌，2010）。如细粒化增强了岩石的活性和渗透性，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，流体作用可以加速应变体系中物质组成的迁移与交换，退变质反应可使围岩释放出 SiO_2 、 CO_2 、 H_2O 、Au、Fe、Cu、S、Pb、Zn 等成分，构成热液流体。

在浅部相对低温条件下，岩石遭受压应力作用时，其中一部分力将使岩石产生脆性形变，导致岩石碎裂，另一部分力克服摩擦阻力做功并转换为热量（刘康怀，1997），导致岩石受力作用的同时，获得热能和势能。岩石中的主量元素 K、Na、Ca、Mg 等具有较低的活化能，但当岩石在变形过程中，受到机械破碎和机械功转化为热能时，这些组分就可能被活化转移。由于主量元素从岩石中迁移出后，金属元素的含量就相对增加，形成局部富集。

脆-韧性转换带对于热液成矿的作用的意义在于，其一，它实际成为热液流体循环的深度下限，也成为多数热液成矿作用的深度下限，在此转换带深度之上岩石发生脆性破裂，断裂为流体循环提供了通道。在此深度之下，韧性状态岩石少有断裂发育，高温高压下粒间渗流也微乎其微，低

渗环境限制了流体的大规模循环，热液成矿丧失了最基本的地质营力。其二，该脆韧性转换带实际上也是有震和无震的转换带，地震成因的流体循环机制如地震泵吸作用等在无震状态下就无从产生（周利敏等，2008）。在韧性、脆-韧性构造层次，一般易在弱应变域中形成流体型成矿构造，而在脆性构造层次，一般易于在强应变带内形成构造型成矿构造（汪劲草等，2015）（图 5）。剪切带中成矿作用发生的构造层次主要取决于应力集中能否导致脆性破裂的产生，从而出现压力骤降满足流体闪蒸的条件使金发生沉淀。

随着构造应力的持续作用，应力集中→脆性破裂（碎裂）→压力骤降→流体闪蒸→元素析出的构造地球化学过程循环发生，造成剪切带中金品位不断提高，逐渐形成大型金矿。总之，剪切带型金矿是在同一岩体-流体-构造系统下形成的，三者之间的耦合对成矿作用至关重要，其中构造应力与流体配合所发生的构造地球化学过程是导致剪切带中金发生沉淀的关键。在应力的驱动下，矿物晶体发生变形，形成与应力场相对应的“矿物场”，从而形成“元素场”（元素分布）。从微观层面对于脆韧性转化和韧性剪切带岩石在构造变形过程中的矿物成分变化，元素迁移、富集规律进行定量研究，是探讨剪切变形发生、发展和演化过程中，与之同步的岩石化学组成的迁移聚集作用的主要手段。

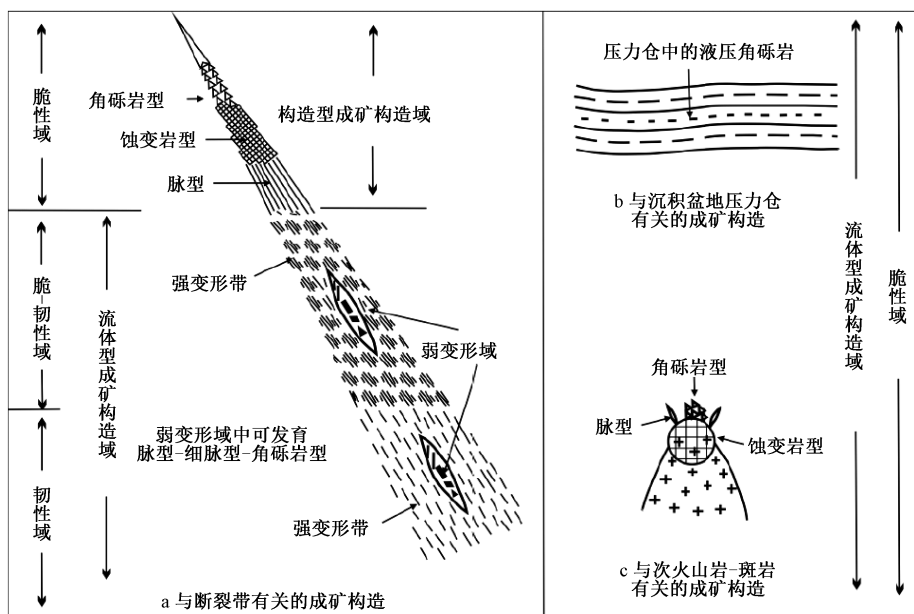


图5 三种常见的构造系统中的成矿构造类型

Fig. 5 Diagram showing the metallogenic structural types in three common structural systems

3 剪切带的成分变异与体积变化

在剪切带内, 由应变局部化和力学失稳, 引起化学不平衡和组分的迁移, 以及由流体与岩石相互作用和变质反应的加强, 使剪切带内岩石的矿物组成和化学成分得以调整。不同剪切带其组分的相对变化或得失状态不尽一致, 这主要取决于原岩的性质、剪切带的温压条件以及流体的成分和通量等 (钟增球, 1996)。其中流体和岩石的相互作用不仅改变了原岩的成分, 而且也改变了流体本身的成分和物理化学性状, 并可能由此促成物质的沉淀而利于成矿。韧性剪切带中流体与岩石的相互作用, 及其化学效应和物理效应的局部化, 导致了化学不平衡和组分的迁移, 使化学成分重新调整, 在宏观上表现为岩石变形, 在微观上表现为元素的带入和带出, 从而引起元素的富集成矿 (魏俊浩等, 1999)。

剪切带中一些相对稳定组分的变异, 主要与剪切带的体积变化有关。应变测量也证实了剪切带体积的变化。剪切带的体积亏损在不同的构造背景、不同的变质级别下都可发生, 尤以角闪岩相和绿片岩相条件下强变形岩石中较为明显, 而一般在较浅变质和较弱变形的岩石中体积亏损较小 (O'Hara, 1994)。Wintsch and Yeh (2013) 对红河断裂韧性剪切带内糜棱岩研究表明, 在流体

作用下, 斜长石和钾长石发生水解反应, 不仅促进了变形, 而且引起岩石体积变化 (表1), 形成新的矿物, 这对糜棱岩的形成与金属矿物的聚集起到至关重要的作用。显然, 剪切带的体积亏损与流体的渗透和流动有关。较大的体积亏损, 意味着剪切带中有较大量的渗透流体, 这对剪切带的流变行为、化学行为和成矿作用都有着深刻的影响。

对于中—东非马拉维北部退化的角闪岩相剪切带研究发现, 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 (Ring, 1999)。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, 导致了黑云母的分解。钟增球和游振东 (1995) 发现剪切作用过程中岩石体积亏损高达 28%, 由 SiO_2 亏损量算得水/岩比值为 42~550, 反映剪切作用过程中大量渗透流体加入影响着剪切带的流变行为和成矿作用; 而孙晓明等 (1996) 的研究则表明, 夹皮沟金矿带韧性构造变形为近等体积变形 ($F \approx 1$), 剪切作用导致 SiO_2 带出以及成矿物质富集。

因此流体与剪切带变形作用下, 岩石中的物质成分交换改变了原岩的化学成分, 造成一些元素随流体的迁移, 导致剪切带的体积变化。流体和岩石之间的相互作用同时改变了流体本身的成分和物理化学性状, 并可能由此促成物质的沉淀而

表 1 流体作用下糜棱岩中的矿物体积发生变化

Table 1 Changes of mineral volume in mylonite under fluid action

	反应式	ΔV (反应固体体积 变化值) / (cm ³ /mol)	ΔV (反应固体体积 变化百分率) /%
1	K-feldspar+Na ⁺ =Albite+K ⁺	-9	-8
2	3Albite+2H ⁺ +K ⁺ =muscovite+6SiO ₂ +3Na ⁺	-23	-8
3	3K-feldspar+2H ⁺ =muscovite+6SiO ₂ +2K ⁺	-49	-8
4	2Phlogopite+4H ⁺ +H ₂ O=clinocllore+3SiO ₂ +Mg ⁺⁺ +2K ⁺	-25	-8
5	Phlogopite+6H ⁺ =K-feldspar+3Mg ⁺⁺ +4H ₂ O	-41	-27
6	2K-feldspar+5Mg ⁺⁺ +8H ₂ O=clinocllore+3SiO ₂ +2K ⁺ +8H ⁺	61	30
7	3clinocllore+2K ⁺ +28H ⁺ =2muscovite+3SiO ₂ +Mg ⁺⁺ +24H ₂ O	-272	-44
8	3muscovite+5biotite+9SiO ₂ +4H ₂ O=8K-feldspar+3clinocllore	-41	-2.7

利于成矿。韧性剪切带内流体作用下构造应力如何影响成岩成矿及变质相的化学平衡是值得研究的。

4 韧性剪切带内成矿模拟实验研究

天然成矿体系经历的地质事件复杂，特别是很容易受后期热液活动的影响。模拟实验是构造动力成矿研究中的一大特色，除以往采用的普通光弹模拟、激光全息光弹模拟实验以及计算机模拟实验研究之外，最为典型的实验是对实际的含矿岩石进行的高温高压变形实验，其通过观察和测试样品组构和成份的变化，考察一定温压条件下，伴随含矿岩石的构造变形所带来的成矿物质组份的迁移和聚集，进而探讨构造动力成矿作用机理。

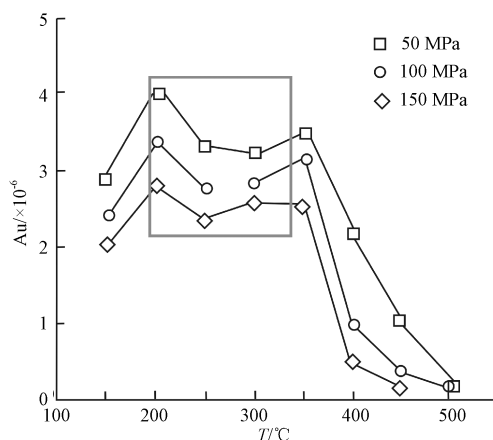
一些学者根据已有的剪切成矿模式和剪切成矿的物理化学条件，对韧性剪切成矿作用进行了模拟实验研究。岳石等（1990）、陈先兵（1994）、肖化云和吴学益（1997）、吴学益等（1999，2007）都开展了高温高压成矿实验，初步结果表明：随着实验温度、压力的增高，韧性剪切作用和成矿物质活化、物质组分迁移聚集明显增强，物质组分迁移的方式有塑性流动、扩散与化学反应和热液携带；在高温高压及流体的作用下，成矿元素被激活带出，其迁出量与温度和压力呈正相关关系；在韧性剪切变形向脆性变形转化阶段，有利于金的沉淀富集。陈正乐等（1996）在温度 600~700℃，围压和轴压 300~500 MPa，差应力 50~150 MPa 的条件下，对黑云母斜长片麻岩、矽卡岩及黄铁矿矿石，进行了高温高压实验，研究结果表明，成矿元素 Cu、Pb、Zn 和 Co 等由于应力的作用，活动能力加强，易从先前的平衡态或

准平衡态中摆脱出来；同时，在应力的作用下，岩块的变形也改变了岩块内部不同部位的势能，从而使这些元素在构造应力的驱使下发生迁移；而当这些元素迁移到一定部位后，由于其势能的变化，元素重新达到平衡，从而发生富集（戴塔根和刘成湛，1990）。陈柏林（2000）通过对枫树板矿区矿石的高温高压实验研究表明，高温高压条件下的变形和构造应力作用促使矿物元素活化分异并发生迁移，与 SiO₂ 等易分异组分构成动力分异热液参与成矿作用。另外，熔融实验证实了变形过程中 Au 通常富集于富 K、Al、Si 的部位（许德如，2002）。

通过高温高压实验，在有效控制温度、压强、氧逸度和流体成分的条件下对成矿作用进行研究，是成矿研究中非常重要的方法。有学者研究认为，从韧性到脆-韧性剪切带迁移过程中，因温度降低而造成金沉淀（王义天等，2004；熊德信等，2007；Chai et al., 2016；Sun et al., 2016）。Benning and Seward（1996）的计算结果，显示压力缓慢下降会增大金在流体中的溶解度（图 6）。

上述高温高压实验结果充分说明，构造应力作用不仅形成导矿通道和赋矿空间，同时可以使岩石（矿物）中成矿组分发生活化转移，并沿构造裂隙及其附近应力降低的空间沉积富集成矿。总之，这些实验模拟成果不仅验证了构造控岩控矿的地质现象，而且还揭示了有关热液成矿理论方面的某些新机理，尤其是为脆-韧性剪切带金矿成矿作用过程中岩石构造破裂、流体和矿质聚集等的研究提供了依据。

因此，通过高温高压变形实验，为构造动力成矿提供了某些新的证据，对深化剪切带型矿床等成矿机理认识、总结成矿规律、指导成矿预测实践具有重要意义。



灰色方框代表在金的成矿温度 200~350 °C 时, 随着压力下降金的溶解度增大。

图 6 不同压力条件下温度对金溶解度的影响 (Benning and Seward, 1996)

Fig. 6 Sketch map of the influence of temperature on the gold solubility under different pressure (after Benning and Seward, 1996)

5 讨论

剪切带中流体与岩石的相互作用所涉及的内容很多, 也是窥测陆壳乃至大陆岩石圈中流体与岩石相互作用的视点。

构造变形与成岩成矿及变质作用有密切的共生关系, 但是这一现象的原因尚需探索。其中重要的一个问题是, 构造应力通过什么途径和方式影响化学过程。构造动力成矿作用过程是机械能积累、转化和释放过程。在这一过程中, 构造动力不仅能为成矿物质提供运移通道和停积空间, 而且更重要的是能够促进元素的活化、迁移和聚集成矿。构造变形是差应力的产物, 而地球化学反应被证实大多数要经过流体的状态, 受温度和压力等条件控制, 其中压力对化学过程、化学平衡来说是最为重要的物理化学参变量, 对成岩成矿过程的发生具有重要的影响。处于较高温度和压力环境下的韧性剪切带, 尽管内部可以存在一些微裂隙和物质的流动, 但主要表现为固体韧性流动, 它是通过晶体边界滑移、晶体位错和塑性流动等方式来完成的。在此过程中, 岩石具有封闭性, 不能产生大量低压空间。因此, 它不是岩浆和热液运移的良好通道。然而, 一旦韧性剪切带发展到一定阶段, 在同一温压条件下转化为剪

切破裂, 就有可能贯通造成低压空间, 情况就完全不同了。这时处于原先温压平衡状态下的岩石, 一方面, 由于剪切断裂使压力骤减, 岩石的熔点降低, 致使温度高于部分矿物的熔点, 可导致岩石部分熔融, 形成岩浆, 并沿脆性断裂侵位或上升。另一方面, 也可使少部分低熔点矿物 (如石英) 熔融, 在此过程中, 压力梯度效应可使岩石中的粒间溶液析离出来, 与石英、水等成分混合, 形成流体相, 并携带大量的成矿物质向剪切破裂带运移、聚集。同时, 由于围岩的应力骤减和释放, 流体出现卸载, 致使大量矿质的溶解度降低, 最终导致沉淀而富集成矿。

高温高压变形实验为构造动力成矿提供了新的证据, 对深化剪切带型金矿等成矿作用机理认识、总结成矿规律、指导成矿预测实践具有重要意义。相关的高温高压实验的探索, 在解释构造应力与地壳物质的变形、流体和成矿物质富集的机理等方面做出相当的贡献, 但是绝大多数实验为静压状态或压缩实验, 无法实现岩石剪切变形与流体之间的相互作用。因此, 未能令人信服地解释在构造应力作用下岩石矿物的形成、形变与相变过程中成矿元素的迁移、沉淀和富集的机理。而且有些高温高压实验的温压条件可能受限, 限制了在不同温压条件下的剪切变形与矿物成分变化和元素迁移关系的研究。另外, 韧性剪切作用改变岩石的组构, 使得主要造岩矿物晶格变形, 增加了元素的活性和扩散速度, 所以岩石化学成分的改变在微观上表现为矿物化学成分的改变, 这就可以从矿物晶体结构和矿物化学成分的角度探讨岩石宏观上的变化。

6 结论

有关韧性剪切带中金的成矿机制已经有较深入程度的研究, 但总体看来, 无论国内国外, 到目前为止, 绝大多数同类工作着重研究剪切带中宏观微观变形, 以及剪切过程中的元素变化规律, 而对剪切变形中伴随流体的来源、组成和演化、水/岩反应及金等微量元素的地球化学行为等方面少有深层次的研究, 对剪切过程中流体的同位素演化也很少涉及。因此, 加强构造应力对温度、岩石物理性质、地球化学相平衡和水岩体系的相关参量影响的综合研究, 在分析大陆岩石圈结构

及动力学过程, 解释成岩成矿机理等方面具有重要意义。

致谢: 感谢审稿专家和编辑部提出的指导与修改意见, 对提高论文质量有很大的帮助。

References

- ALLIBONE A H, CORDERY G R, MORRISON G W, et al., 1995. Synchronous advanced argillic alteration and deformation in a shear zone-hosted magmatic hydrothermal Au-Ag deposit at the Temora (Gidginburg) mine, new south Wales, Australia [J]. *Economic Geology*, 90 (6): 1570-1603.
- AUDÉTAT A, GÜNTHER D, HEINRICH C A, 1998. Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions [J]. *Science*, 279 (5359): 2091-2094.
- BELLOT J P, 2007. Extensional deformation assisted by mineralised fluids within the brittle-ductile transition: insights from the southwestern massif central, France [J]. *Journal of Structural Geology*, 29 (2): 225-240.
- BENNING L G, SEWARD T M, 1996. Hydrosulphide complexing of Au (I) in hydrothermal solutions from 150-400 °C and 500-1500 bar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (11): 1849-1871.
- CHAI P, SUN J G, XING S W, et al., 2016. Ore geology, fluid inclusion and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology constraints on the genesis of the Yingchengzi gold deposit, southern heilongjiang province, NE China [J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 1022-1036.
- CHEN B L, 2000. Relation between types of structural deformation and gold mineralization [J]. *World Geology*, 19 (3): 217-223, 239. (in Chinese with English abstract)
- CHEN S H, HAN R S, SHENTU L Y, et al., 2016. Alteration zoning and geochemical element migration in alteration rock of Zhaotong lead-zinc deposit in northeastern Yunnan mineralization concentration Area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46 (3): 711-721. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X B, 1994. A high T-p model experiment of granodiorte porphyry and its metallogenic significance to metallization [J]. *Geological Science and Technology Information*, 13 (2): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z L, ZHOU X Q, YANG N, et al., 1996. Modeling the migration and accumulation of ore-forming elements under high temperatures and pressures [J]. *Journal of Geomechanics*, 2 (2): 90-93. (in Chinese with English abstract)
- DAI T G, LIU C Z, 1990. A primary approach to the relationship between structural stress and migration of elements [J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 10 (3): 247-250. (in Chinese with English abstract)
- FU S L, HU B, 2010. Discuss metallogenic model of ductile shear zone type gold deposit from microcosmic scale [J]. *Gold Science and Technology*, 18 (2): 31-34. (in Chinese with English abstract)
- GHISETTI F, KIRSCHNER D, VEZZANI L, 2000. Tectonic controls on large-scale fluid circulation in the Apennines (Italy) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 69-70: 533-537.
- GLAZNER A F, BARTLEY J M, 1991. Volume loss, fluid flow and state of strain in extensional mylonites from the central mojave desert, California [J]. *Journal of Structural Geology*, 13 (5): 587-594.
- GRATIER J P, GUIGUET R, RENARD F, et al., 2009. A pressure solution creep law for quartz from indentation experiments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 114 (B3): B03403.
- HEDENQUIST J W, LOWENSTERN J B, 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 370 (6490): 519-527.
- HU R Z, WEN H J, SU W C, et al., 2014. Some advances in ore deposit geochemistry in last decade [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33 (2): 127-144. (in Chinese with English abstract)
- KISTERS A F M, KOLB J, MEYER M F, 1998. Gold mineralization in high-grade metamorphic shear zones of the renco mine, southern Zimbabwe [J]. *Economic Geology*, 93 (5): 587-601.
- KOONS P O, CRAW D, COX S C, et al., 1998. Fluid flow during active oblique convergence: a southern Alps model from mechanical and geochemical observations [J]. *Geology*, 26 (2): 159-162.
- LAWLEY C, IMBER J, SELBY D, 2013. Structural controls on orogenic Au mineralization during transpression: Lupa goldfield, southwestern Tanzania [J]. *Economic Geology*, 108 (7): 1615-1640.
- LI X F, HUA R M, 2000. A study on fluid action in the ductile shear zone: a review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19 (4): 333-340. (in Chinese with English abstract)
- LI Z W, TIAN M, 2015. The sum up of some basic problems in tectonic dynamic metallogenesis study [J]. *Yunnan Geology*, 34 (4): 485-491. (in Chinese with English abstract)
- LIN C Y, HE Y N, CHEN X D, et al., 1994. Relationship between ductile shear zone and gold mineralization—Taking Jinchangyu gold mine, Eastern Hebei Province, China [J]. *Science in China Series B*, 24 (11): 1223-1232. (in Chinese with English abstract)
- LIU K H, 1997. High pressure and temperature experiment study on halo-forming and metallogenic mechanism of gold [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 21 (3): 213-220. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z M, ZHANG W P, HUANG G P, et al., 2001. Fluid in shear

- zones of metamorphic rock and its relation with alteration and gold [J]. *Hubei Geology & Mineral Resources*, 15 (4): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- LÜ G X, DENG J, LI X B, et al., 2006. Study and problems of tectophysicochemistry [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (10): 1616-1626. (in Chinese with English abstract)
- LV G X, 1997. The studies and application of tectonic physicochemistry [J]. *Chinese Geology*, (10): 45-48. (in Chinese)
- LV G X, 2003. Advances in tectonic physico chemistry [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (2): 101-109. (in Chinese)
- LYU G X, 2019. Research on tectonic dynamo-petrogenesis and metallogenesis and tectonophysicochemistry [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (5): 962-980. (in Chinese with English abstract)
- O'HARA K D, 1994. Fluid-rock interaction in crustal shear zones: a directed percolation approach [J]. *Geology*, 22 (9): 843-846.
- PHILLIPS W J, 1972. Hydraulic fracturing and mineralization [J]. *Journal of the Geological Society*, 128 (4): 337-359.
- QIU X P, 1999. Deep ductile shear deformation and gold metallogenesis [J]. *Gold Geology*, 5 (3): 6-12. (in Chinese with English abstract)
- RING U. 1999. Volume loss, fluid flow, and coaxial versus noncoaxial deformation in retrograde, amphibolite facies shear zones, northern Malawi, east-central Africa [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 111 (1): 123-142.
- ROBL J, FRITZ H, STÜBE K, et al., 2004. Cyclic fluid infiltration in structurally controlled Ag-Pb-Cu occurrences (Schladming, Eastern Alps) [J]. *Chemical Geology*, 205 (1-2): 17-36.
- SIBSON R H, SCOTT J, 1998. 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*, 13 (1-5): 293-306.
- SUN S L, 1995. The metallization of gold deposit in shear zone [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 19 (4): 375-381. (in Chinese with English abstract)
- SUN X M, WEI H X, ZHAI W, et al., 2016. Fluid inclusion geochemistry and Ar-Ar geochronology of the cenozoic Bangbu orogenic gold deposit, southern Tibet, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 74: 196-210.
- SUN X M, XU K Q, REN Q J, et al., 1996. Fluid rock interactions and chemical components variations during ductile deformation in the Jiapigou gold belt [J]. *Mineral Deposits*, 15 (4): 308-317. (in Chinese with English abstract)
- WAN T F, 2008. Some problems in the study of structural geology and tectonics in China [J]. *Geological Bulletin of China*, 27 (9): 1441-1450. (in Chinese with English abstract)
- WANG C Z, LI X F, YI X K, 2009. Gold mineralization during progressive deformation in Jinshan ductile shear zone, Jinshan gold deposit, Jiangxi province: evidence from microscopic deformation structures [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 29 (2): 169-182. (in Chinese with English abstract)
- WANG J C, WANG F L, TANG J R, et al., 2015. Mineralization and its geological significance in weak deformational domains [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39 (2): 280-285. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y T, MAO J W, LI X F, et al., 2004. Gold mineralization related to the shear zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 11 (2): 393-400. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z C, WANG Y N, 1987. Structural deformation and hydrothermal mineralization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 61 (2): 126-137. (in Chinese with English abstract)
- WEATHERLEY D K, HENLEY R W, 2013. Flash vaporization during earthquakes evidenced by gold deposits [J]. *Nature Geoscience*, 6 (4): 294-298.
- WEI J J, ZHANG D H, WANG S Y, et al., 1999. Discrimination study on fluid/rock interaction within metallogenic and non-metallogenic sections in shear zone [J]. *Chinese Journal of Geology*, 34 (4): 473-484. (in Chinese with English abstract)
- WHITMEYER S J, WINTSCH R P, 2005. Reaction localization and softening of texturally hardened mylonites in a reactivated fault zone, central Argentina [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 23 (6): 411-424.
- WINTSCH R P, YEH M W, 2013. Oscillating brittle and viscous behavior through the earthquake cycle in the red river shear zone: monitoring flips between reaction and textural softening and hardening [J]. *Tectonophysics*, 587 (2): 46-62.
- WU X Y, SHANG J H, ZHANG K P, 2007. The characteristics of ore-controlling structures and simulating experiments of Jinshan gold deposit [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27 (2): 143-152. (in Chinese with English abstract)
- WU X Y, YANG Y G, XIAO H Y, et al., 1999. Coupling in ore-controlling factors of Cu and Au in the northeast Jiangxi fracture zone and simulating experiments [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23 (1): 3-15. (in Chinese with English abstract)
- XIAO H Y, WU X Y, 1997. Tectonic deformation features of Jinshan gold orefield: A simulating experiment [J]. *Geology-Geochemistry*, (3): 80-86. (in Chinese with English abstract)
- XIONG D X, SUN X M, ZHAI W, et al., 2007. CO₂-Rich fluid inclusions in auriferous quartz veins from the Daping ductile shear zone hosted gold deposit in Yunnan province, China, and its

implications for gold mineralization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81 (5): 640-653. (in Chinese with English abstract)

XU D R, 2002. Study on the experimentation of Baoban group under high pressure and high temperature and the metallogenic mechanisms of gold deposits on Hainan island [J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 26 (2): 207-215. (in Chinese with English abstract)

XU D R, WU C J, LV G X, et al., 2015. Application of lithospheric rheology in structural metallogenesis: taking BIF-type iron-rich ore deposits as an example [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39 (1): 93-109. (in Chinese with English abstract)

XU X W, NIU L, HONG T, et al., 2019. Tectonic dynamics of fluids and metallogenesis [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (1): 1-8. (in Chinese with English abstract)

YANG W R, ZHANG W H, 1996. Tectonic fluids a new research domain [J]. *Earth Science Frontiers*, 3 (3-4): 124-130. (in Chinese with English abstract)

YANG X Y, 2005. On the studies of ductile shear zones: their geological significance [J]. *Advances in Earth Science*, 20 (7): 765-771. (in Chinese with English abstract)

YARDLEY B W D, VALLEY J W, 1997. The petrologic case for a dry lower crust [J]. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B6): 12173-12185.

YUE S, MA R, WANG Z C, 1990. Experimental achievements on ductile deformation structures and metallization [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 5 (4): 30-36. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B Y, ZHANG A P, YU H N, et al., 1992. Retrogressive metamorphic process in Huangshan ductile shear zone and its relationship to gold mineralization, Zhejiang province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 7 (1): 1-9. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L C, ZENG Z R, YANG X K, et al., 1997. Tectono geochemical characteristics of the ductile shear zone type gold deposit in Kanggul, Xinjiang [J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 6 (1): 13-21. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y Y, ZHOU Y S, 2012. The strength and deformation mechanisms of brittle-plastic transition zone, and the effects of strain rate and fluids [J]. *Seismology and Geology*, 34 (1): 172-194. (in Chinese with English abstract)

ZHONG Z Q, 1996. Fluid rock interaction in shear zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 3 (3-4): 209-215. (in Chinese with English abstract)

ZHONG Z Q, YOU Z D, 1995. Compositional variation and volume loss of a shear zone: Hetai shear zone as a case History [J]. *Chinese Science Bulletin*, 40 (19): 1638-1641.

ZHOU L M, ZHANG D H, XI B B, 2008. Rock permeability, fluid flow and hydrothermal ore-forming processes [J]. *Earth Science Frontiers*, 15 (3): 299-310. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈柏林, 2000. 构造变形类型与金矿化类型的关系 [J]. *世界地质*, 19 (3): 217-223, 239.

陈随海, 韩润生, 申屠良义, 等, 2016. 滇东北矿集区昭通铅锌矿区蚀变岩分带及元素迁移特征 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 46 (3): 711-721.

陈先兵, 1994. 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*, 13 (2): 63-69.

陈正乐, 周显强, 杨农, 等, 1996. 高温高压下成矿元素运移聚集模拟实验 [J]. *地质力学学报*, 2 (2): 90-93.

戴塔根, 刘成湛, 1990. 构造应力与元素迁移关系初探 [J]. *桂林冶金地质学院学报*, 10 (3): 247-250.

付山岭, 胡斌, 2010. 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*, 18 (2): 31-34.

胡瑞忠, 温汉捷, 苏文超, 等, 2014. 矿床地球化学近十年若干研究进展 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33 (2): 127-144.

李晓峰, 华仁民, 2000. 韧性剪切带内流体作用的研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 19 (4): 333-340.

李志伟, 田敏, 2015. 构造动力成矿作用研究的某些基本问题综述 [J]. *云南地质*, 34 (4): 485-491.

林传勇, 何永年, 陈孝德, 等, 1994. 韧性剪切带与金矿化的关系: 以冀东金厂峪金矿床为例 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 24 (11): 1223-1232.

刘康怀, 1997. 高温高压实验研究与金的成矿成晕机理探讨 [J]. *大地构造与成矿学*, 21 (3): 213-220.

刘忠明, 张万平, 黄国平, 等, 2001. 变质岩区剪切带流体与蚀变和金的成矿作用 [J]. *湖北地矿*, 15 (4): 45-49.

吕古贤, 1997. 构造物理化学的研究与应用 [J]. *中国地质* (10): 45-48.

吕古贤, 2003. 构造物理化学的研究进展 [J]. *科学通报*, 48 (2): 101-109.

吕古贤, 邓军, 李晓波, 等, 2006. 构造物理化学的思路、研究和问题 [J]. *地质学报*, 80 (10): 1616-1626.

吕古贤, 2019. 构造动力成岩成矿和构造物理化学研究 [J]. *地质力学学报*, 25 (5): 962-980.

邱小平, 1999. 深部韧性剪切变形与金矿成矿作用 [J]. *黄金地质*, 5 (3): 6-12.

孙胜龙, 1995. 韧性剪切带中金成矿机理浅析 [J]. *大地构造与成矿学*, 19 (4): 375-381.

孙晓明, 徐克勤, 任启江, 等, 1996. 夹皮沟金矿带韧性剪切变形中的水岩反应及物质组分变化规律 [J]. *矿床地质*, 15 (4): 308-317.

万天丰, 2008. 关于中国构造地质学研究中几个问题的探讨 [J]. 地质通报, 27 (9): 1441-1450.

王春增, 李晓峰, 易先奎, 2009. 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, 29 (2): 169-182.

汪劲草, 王方里, 汤静如, 等, 2015. 弱变形域成矿及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 39 (2): 280-285.

王义天, 毛景文, 李晓峰, 等, 2004. 与剪切带相关的金成矿作用 [J]. 地学前缘, 11 (2): 393-400.

王子潮, 王亚南, 1987. 构造变形与热液成矿 [J]. 地质学报, 61 (2): 126-137.

魏俊浩, 张德会, 王思源, 等, 1999. 剪切带中矿化与非矿化地段流体: 岩石相互作用差异性研究 [J]. 地质科学, 34 (4): 473-484.

吴学益, 杨元根, 肖化云, 等, 1999. 赣东北断裂带铜、金成矿控制因素耦合作用及其模拟实验 [J]. 大地构造与成矿学, 23 (1): 3-15.

吴学益, 尚精华, 张开平, 2007. 金山金矿构造控矿特征及其模拟实验 [J]. 矿物学报, 27 (2): 143-152.

肖化云, 吴学益, 1997. 金山金矿田构造变形特征及其模拟实验 [J]. 地质地球化学 (3): 80-86.

熊德信, 孙晓明, 翟伟, 等, 2007. 云南大坪韧性剪切带型金矿富 CO₂ 流体包裹体及其成矿意义 [J]. 地质学报, 81 (5): 640-653.

许德如, 2002. 海南岛抱板群岩石高温高压实验及金成矿机理探讨

[J]. 大地构造与成矿学, 26 (2): 207-215.

许德如, 吴传军, 吕古贤, 等, 2015. 岩石流变学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, 39 (1): 93-109.

徐兴旺, 牛磊, 洪涛, 等, 2019. 流体构造动力学与成矿作用 [J]. 地质力学学报, 25 (1): 1-8.

杨巍然, 张文淮, 1996. 构造流体: 一个新的研究领域 [J]. 地学前缘, 3 (3-4): 124-130.

杨新岳, 谢国源, 李志纯, 1995. 变形过程中的流体-岩石作用和变形岩石质量平衡 [J]. 中国科学 (B 辑), 25 (3): 329-336.

杨晓勇, 2005. 论韧性剪切带研究及其地质意义 [J]. 地球科学进展, 20 (7): 765-771.

岳石, 马瑞, 王子潮, 1990. 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, 5 (4): 30-36.

张伯友, 张爱萍, 俞鸿年, 等, 1992. 浙江横山韧性剪切带退变质作用与金矿化关系的讨论 [J]. 地质找矿论丛, 7 (1): 1-9.

张连昌, 曾章仁, 杨兴科, 等, 1997. 康古尔韧性剪切带型金矿构造地球化学特征 [J]. 贵金属地质, 6 (1): 13-21.

张媛媛, 周永胜, 2012. 断层脆塑性转化带的强度与变形机制及其流体和应变速率的影响 [J]. 地震地质, 34 (1): 172-194.

钟增球, 1996. 剪切带的流体-岩石相互作用 [J]. 地学前缘, 3 (3-4): 209-215.

周利敏, 张德会, 席斌斌, 2008. 岩石中的渗透率、流体流动及热液成矿作用 [J]. 地学前缘, 15 (3): 299-310.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）:

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

