

流体的构造作用与成矿*

徐兴旺 蔡新平 张宝林 秦大军 王杰

(中国科学院地质研究所, 北京)

提 要: 流体的构造作用指由流体自身物理状态和化学组分与特性所引起的构造作用及其动力学过程。流体的构造作用方式可概括为八个方面, 流体构造的类型丰富多样, 同一成因、同时形成、不同特征的流体构造在空间分布上具特定的组构特征。流体的构造作用与金属矿床成矿作用关系密切, 在成矿过程中起到开辟前进通道、营造容矿空间和萃取富集成矿元素的作用。

关键词: 流体 构造动力学 成矿

流体的构造作用 (Tectonic functions of fluids) 指由流体自身物理状态 (温度、压力和运动等) 和化学组分与特性 (酸碱度、氧逸度和溶解度等) 所引起的构造作用及其动力学过程, 是流体构造动力学的主要研究内容, 是当今地球科学的前沿课题。流体的构造作用与金属矿床成矿作用关系密切 (如阿根廷圣胡安省的圣弗朗西斯科铜矿床、我国甘肃白银厂折腰山铜矿床、山东七宝山金铜矿床、新疆康古尔金矿床、滇西北衙金矿床和冀西北后沟金矿床等), 并已引起一些学者的关注和重视 (布赖恩特, 1968; 拉姆贝斯等, 1969; 蔡新平, 1991, 1994; 徐兴旺等, 1994, 1996, 1998; 徐兴旺, 1996)。本文就流体的构造作用方式、流体构造类型与分带、及其与成矿作用关系等方面的研究作一简单的回顾和总结, 旨在推动流体构造动力学与成矿动力学的研究。

1 流体的构造作用方式

流体的构造作用方式是多样的, 可概括为以下几个方面的:

(1) 具较高压力的流体对岩石的直接破坏作用。Hubbert 和 Willis (1957) 提出了水压致裂理论, 他们认为: 岩石中存在许多封闭的破裂、节理, 破裂和节理部分的切过孔隙, 这些间隙范围内岩石的强度系数可能接近于零; 要保持间隙区内岩石不发生破裂, 孔隙内的流体压力必需低于最小应力, 一旦流体压力高于该最小应力值时, 在破裂的尖端将出现张应力集中, 破裂迅速地扩展和生长。当高压气液流体的压力突然发生变化 (降低) 时, 气液流体将发生爆炸, 形成爆发角砾岩或侵入角砾岩 (莱特等, 1968), 许多金属矿床都发现有该成因的爆发角砾岩 (布赖恩特, 1968; 拉姆贝斯等, 1969)。Fyfe 等 (1978) 认为地壳深部高的水压可导致断层的形成。Davies 和 Archambeau (1997) 认为高压流体可导致岩石中先存断裂的张开 (open), 并诱发地震的产生。

(2) 流体的运动导致变形构造的形成。岩浆体从深部往上运动和侵位过程, 可使围岩发生变形, 形成褶皱和断裂构造 (Zheng Y. 等, 1988; 马昌前, 1991; 李东旭, 1996)。钱维宏 (1996) 认为全球构造的形成与地球内部流体运动有关。流体运动还可引发地震, 如水库诱发地震就起因于水库蓄水而导致地下水动态异常 (孙雄等, 1996)。

(3) 流体及流体压力直接影响和促进岩石的变形。Hubbert 和 Rubey (1959) 较早地注意到流体压力对逆冲推覆断层力学成因机制的作用, 流体超压在逆冲推覆构造的运动中起到气垫托的作用 (Meissner 等,

* 本文得到中国科学院“九五”黄金重大项目 (编号 KZ951-A1-404) 资助

徐兴旺, 男, 1966年生, 博士后, 助理研究员, 主要从事地质力学、构造地质学、构造与成矿研究。邮政编码: 100029

1992)。Hobbs (1981) 曾系统回顾了变质环境(温度、压力和流体)对矿物变形的影响,不同化学组分的流体与温度压力一起控制矿物点缺陷的集中和活动。Rutter (1974) 对温度、应变速率和裂隙水对钙质岩石变形影响的实验研究结果显示,在温度 20~500℃ 范围内水的孔隙压力对 Carrara 大理岩的变形影响不大,而在常温下孔隙水对 Solnhofen 大理岩的变形具软化的作用,但这种软化作用在高温下将变得非常有限。流体的孔隙压力还控制着岩石的变质过程,影响熔融作用的速率和深度。

(4) 流体作为润滑剂可降低岩石矿物颗粒间的摩擦系数(Wintsch 等, 1995), 利于颗粒的粒间滑移, 促进岩石的韧性变形和剪切带的发展(Newton, 1990)。

(5) 流体与岩石矿物相互作用, 发生变质反应, 形成新的易于变形的片状矿物或细粒状矿物, 强化岩石的韧性和塑性。Beach (1973) 在研究 Scourie 花岗岩中的剪切带时提出, 带内的白云母是长石在水的作用下退变质形成的。Hammer (1981) 在研究 Newland 花岗岩剪切带中钾长石、斜长石的显微构造和构造化学特征时指出, 由于 Na_2O 、 SiO_2 的加入, 剪切带中斜长石相变为钠长石、方解石和绿帘石, 钾长石相变为奥长石, 并分泌出大量的 SiO_2 。Rubie (1983) 认为变质反应形成新的细小矿物, 如斜长石反应为细小的硬玉和石英、橄榄石变质为尖晶石或 β 相形成细粒矿物, 可强化岩石的韧性, 这对于板块俯冲带的形成和演化具有重要意义。徐兴旺 (1991, 1994, 1996) 将这种粒化作用称为变质粒化 (Metamorphic granulitization)。流体与岩石和矿物之间的化学反应, 还可引起矿物物相和体积等的变化并导致岩石和矿物宏观和微观结构、构造与力学性质的变化, 形成新的变形构造。冀西北地区钾化蚀变岩中裂理构造就可能成由于富钾流体对二长岩的交代作用。这种成因的变形构造分布范围较局限, 仅见于流体与岩石矿物之间化学作用较强的地带。

(6) 流体组分的存在和参与直接影响岩石矿物的变形机制和起变形软化的作用。Bell (1979) 在研究 WOODREFFE 逆冲断层糜棱岩带中黑云母的变形时, 发现水对黑云母的变形机制起到重要的作用, 低的水含量利于矿物颗粒边界的粒化, 而高的含水量利于漆褶的形成。Tullis 和 Yund (1980) 对变形花岗岩和多钠长石实验表明, 压力依赖于水对长石的弱化作用。Atkinson 和 Meredith (1981) 在讨论化学环境对应力刻蚀作用影响时, 认为环境中 OH^- 的增加有利于破裂的加快。Mackwell 和 Paterson (1985) 的实验研究结果表明, 在 800~1000℃、1000 MPa 时, 由于 OH^- 进入石英, 石英中产生的缺陷明显增加, 同时在这些缺陷部位的扩散关键也明显增加。Urai (1985) 对光卤石的实验研究表明, 干燥情况下岩石变形以晶格滑移、机械双晶和破裂为主; 而在有水的条件下, 以粒间滑移、压溶迁移为主, 并导致应力降低。Urai 等 (1986) 对岩盐 (rock salt) 流变实验结果显示, 在长时间的流变过程水对岩盐有明显的软化作用 (weakening)。水的软化作用在石英、橄榄石和单斜辉石 (clinopyroxene) 的变形中也非常明显 (Griggs and Blacic, 1964; Griggs, 1967; Blacic, 1971, 1975, 1981, 1984; Boland 等, 1986), 湿石英相对于自然界干石英而言其流变所需的流应力减少量达 90% (Griggs and Blacic, 1965; Kronenberg 等, 1986; Paterson, 1990)。水解软化 (hydrolytic weakening) 机制主要有 Si-O-Si 键的水解 (Griggs and Blacic, 1965)、水压造成的物质扩散 (Kekulawala 等, 1978)、氢离子的介入且 (4H^+) 替代一个 Si 并产生缺陷 (Mclaren 等, 1983) 和 (OH^-) 的介入造成破裂的形成 (Kirby 等, 1984)。Borradaile 和 Mcathur (1990) 对方解石的实验研究表明, 干燥情况下岩石易形成 e 双晶; 高的流体应力阻碍方解石 e 双晶的形成, 而以动态重结晶作用为主。

(7) 流体的溶蚀和溶解作用。酸碱度较高的流体在迁移过程, 将与围岩中的金属矿物或金属离子相互作用, 金属矿物被溶蚀, 金属离子溶解于流体中, 形成金属元素含量较高的含矿流体。这是成矿元素富集迁移的重要机制。甘肃白银厂矿田凝灰岩中草莓状黄铁矿溶蚀构造发育, 岩石中的铜和部分黄铁矿已被流体溶解带走。围岩中造岩矿物(如石英、角闪石等)被流体溶蚀的现象也有发现, 如新疆康古尔金矿床见晶屑凝灰岩中石英晶屑被成矿流体溶蚀成不规则微细粒胶状石英 ($D < 5 \mu\text{m}$), 北京怀柔神堂峪片麻岩中发育的剪切带内粗粒的石英被溶蚀成细粒石英并进入塑性流动带而强化岩石的韧性变形。

(8) 流体的热干扰作用。新疆鄯善县蚂蚱沟金矿床石英脉附近的泥质片岩的片理已明显的被扰乱而形成无序的块状体。热干扰的范围和流体与围岩之间热状态的差异程度有关。

2 流体构造的类型与特征

从前人的研究结果来看，流体的构造作用所形成的变形构造（简称“流体构造”）的类型几乎包罗构造地质学所描述的、由构造动力作用所形成的各种构造，如各种类型的褶皱构造、剪切带构造和角砾状构造等，并有自身特有的一些构造类型，如穿刺构造、溃蚀构造和溃决构造、浊流式流动构造及溶蚀构造等。对于一些常见的变形构造（如褶皱构造和角砾岩带），我们可以根据变形构造的组构特征来鉴别其是否属于流体构造成因。例如流体构造成因的角砾岩，角砾成分可以很复杂，可以有较好的磨圆度，表壳常见冷凝边构造或烘烤边构造，胶结物多为异地深源组分。

流体构造成因和类型与流体自身的物理化学运动特征及围岩岩石力学性质密切相关。如旋转上升侵位的岩体周围常见旋卷构造发育，旋卷构造的结构面可以是韧性或脆性剪切带，也可以是褶皱构造，或两者交替出现。又如与岩浆侵位和隆升有关的伸展剪切带，岩体往外具从韧性向脆性和脆性转化和分带的特征（Zheng Y. 等，1988）。具成生联系的流体构造的组合与结构的研究，可以反演推断流体的运动学和动力学特征。

同一流体作用所形成的流体构造在空间分布上具分带性特征，许多金属矿床中的流体构造都具很好的分带性。甘肃白银厂铜矿田折腰山铜矿床爆发角砾岩体剖面上呈蘑菇状，角砾状构造从下往上可分为 4 个带：① 角砾状矿体，角砾成分为变质结晶黄铁矿，胶结物为黄铜矿矿浆（流体），黄铁矿角砾形态不规则，溃蚀构造和溃决构造发育；② 下部角砾岩带，角砾成分为硅质片岩，角砾呈不规则椭圆状和长条状，具塑性流动的特征，胶结物是以磁铁矿为主的铁锰质；③ 中部角砾岩带，角砾成分为硅质片岩，角砾多呈长方形板状，胶结物是以赤铁矿为主的铁锰质，岩石中浊流式流动构造发育；④ 上部角砾岩化带，硅质片岩角砾岩化，被硅质流体胶结，岩石中溃蚀构造和溃决构造发育（Xu Xingwang 等，1996）。又如，新疆康古尔金矿床的流体构造，从角砾状构造往上依次为：穿刺构造、石英脉穿插分割成因的角砾状构造、胀缩式脉体、藕节状脉体和平直脉体，金主要赋存于角砾状构造岩内（徐兴旺，1996）。流体构造分带性研究对于矿床成矿预测具有重要的意义。

3 流体的构造作用与成矿

地质学家较早地注意到流体的爆发作用及其形成的角砾岩与成矿的关系（莱特等，1968；布赖恩特，1968；拉姆贝斯等，1969；蔡新平，1994；翟裕生，1996）。实际上，流体的构造作用在成矿过程对矿床形成的贡献是多方面的：

(1) 流体构造作用形成的变形构造是成矿流体迁移的有利通道和成矿元素沉淀富集成矿的有利场所，流体构造作用形成的爆破角砾岩带（筒）、破裂构造带和侵入接触带，是许多金属矿床的导矿和容矿构造。如冀西北富钾流体交代二长岩过程形成的、发育于交代岩内的裂理构造，不仅为后期含金黄铁矿流体的迁移提供通道，而且为其沉淀定位提供空间，这可能是发生于钾化之后的金矿化仍选择性地赋存在钾化较强的交代岩中的主要原因。

(2) 流体的构造作用促进岩石矿物的变形和断裂构造的形成，为成矿流体的大规模和远距离迁移提供通道和动力（如断层的切入，可引发流体瞬间突发式运动，向低压区涌流）。

(3) 流体的溶蚀作用和溶解作用可导致围岩中有用的金属元素迁移进入流体，含矿元素不断富集。即，流体的构造作用过程，也是成矿元素的采集与萃取过程。

参 考 文 献

- 1 徐兴旺, 马天林, 孙立倩等. 新疆东天山觉罗塔格韧性挤压带基本特征及动力学意义. 地质科学, 1998, 33 (2): 28~40.
- 2 徐兴旺, 蔡新平, 马天林等. 新疆康古尔金矿床时空四维结构模型. 矿床地质, 1998, 17 (2).
- 3 徐兴旺, 孙立倩, 马天林等. 甘肃白银厂铜多金属矿田矿石的形变相变特征. 矿床地质, 1994, 13 (增刊): 99~101.
- 4 翟裕生. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题. 地学前缘, 1996, 3 (4): 230~236.
- 5 Atkinson B K, Meredith P G. Stress corrosion cracking of quartz : a note on the influence of chemical environment . Tectonophysics. 1981. 77: T1~T11.
- 6 Barnes I. Mineral-water reactions in metamorphism and volcanism. Chemical Geology, 1985, 49 (1~3): 21~29.
- 7 Blacic J D. Effect of water on the experimental deformation of olivine . Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr, 1972, 16: 109~115.
- 8 Fyfe W S, Price N J, Thompson A B. Fluids in the Earth' s Crust. Elsevier , Amsterdam, 1978, 1~100.
- 9 Griggs D T. Hydrolytic weakening of quartz and other silicates. Geophys. J. R. Astron. Soc, 1967, 14: 19~31.
- 10 Griggs D T and Blacic J D. Quartz: anomalous weakness of synthetic crystals. Science, 1965, 147: 292~295.
- 11 Hubbert M K , Rubey W W . Roles of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting . AAPG Bulletin, 1959, 70: 167~206.
- 12 Meissner K, Wever R. The possible role of fluids for the structuring of the continental crust. Earth Science Reviews. 1992, 32: 19~32.
- 13 Rubie D C. Reaction-enhanced ductility : the role of solid-solid univariant reactions in deformation of the crust and mantle. Tectonophysics, 1983, 96: 331~352.
- 14 Rutter E H . The influence of temperature , strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks. Tectonophysics, 1974, 22: 311~334.
- 15 Tobisch O T , Barton M D , Vernon R H , et al. Fluid-enhanced deformation: transformation of granitoids to banded mylonites , western Sierra Nevada , California , and southeastern Australia . Journal of Structural Geology, 1991, 13 (10): 1137~1156.
- 16 Urai J L, Spiers C J, Zwart H J, et al. Weakening of rock salt by water during long-term creep. Nature, 1986, 324: 554~557.
- 17 Urai J L. Water-enhanced dynamic recrystallization and solution transfer in experimentally deformed carnallite. Tectonophysics , 1985, 120: 285~317.
- 18 Wintsch R P, Christoffersen R, Kronenberg A K. Fluid-rock reaction weakening of fault zone. Journal of Geophysical Research B. , 1992, 100 (7): 13021~13032.
- 19 Xu Xingwang, Sun Liqian, Ma Tianlin, et al. Structural characteristics, Petrogenesis and Mineralization of the Massive polymetal deposits in Baiyin, Gansu province, China. Journal of Geomechanics, 1996, 2 (English Supplement). 85~94.
- 20 Zheng Y, Wang Y, Liu R et al. Sliding-thrusting tectonics caused by thermal uplift in the Yunmeng Mountains, BeiKing, China. Journal of Structural Geology, 1988, 10 (2): 135~144.