

文章编号: 1001-8166(2001)03-0324-08

# 流体构造动力学及其研究现状与进展<sup>\*</sup>

徐兴旺, 蔡新平, 王 杰, 张宝林, 梁光河

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 流体构造动力学是介于流体地质学和构造地质学之间的一个重要前沿领域, 主要研究由流体的温度和压力等物理状态及其变化、流体的迁移与运动和流体与岩石矿物发生化学反应等物理与化学过程所引起的构造作用和动力学机制, 研究内容涉及流体与构造的关系、流体的构造作用方式、流体构造类型与动力学成因机制。对流体构造动力学主要研究方向的研究成果进行了总结和回顾, 介绍了流体构造动力学的一些研究进展, 并指出流体是地壳运动、造山作用及岩石的褶皱和断裂等构造过程的重要参与者和组织者。

**关 键 词:** 流体; 构造; 构造动力学; 流体构造动力学

**中图分类号:** P5; P54

**文献标识码:** A

随着流体与构造作用之间相互关系研究的深入开展, 越来越多的地质学家意识到: 流体的运动及其与围岩的相互作用也可导致岩石的破裂和变形, 诱发新的构造作用, 流体是一个重要的构造动力源和构造运动的发动机。为了更好地促进流体构造作用研究的深入开展, 我们认为有必要确立一个与之相对应的研究方向和分支学科, 并称之为流体构造动力学。本文简要介绍了其研究内容、研究现状与进展。

## 1 流体构造动力学概述

流体构造动力学 (Tectonic Dynamics of Fluids) 是介于流体地质学和构造地质学之间的交叉学科, 是当今地球科学研究的前沿课题之一, 其研究方向和研究内容包括基础理论和应用研究两部分。

流体构造动力学基础理论部分主要研究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)所引起的构造作用及其动力学过程, 包括: 由流体的温度和压力等物

理状态及其变化和流体的迁移与运动等物理过程所产生的构造作用和动力学过程。由于流体化学组分的加入导致岩石矿物物理性质的变化和流体与岩石矿物发生化学作用等所引起的构造作用和动力学过程。其研究内容主要涉及流体与构造的关系、流体的构造作用方式、流体构造类型与动力学成因机制。

流体构造动力学应用研究指应用流体构造动力学的理论和研究成果直接或间接解决生产和生活所面临的难题。目前应用较多的领域是石油井下开采、隐伏矿床(含油气)定位预测与地震滑坡等灾害预测。石油井下开采过程所采用的水压致裂榨油技术就是根据流体液压致裂理论开展的。

流体构造动力学的研究工作从流体与岩石矿物相互作用过程所形成和保存于岩石矿物中的形变相变形迹的研究着手, 划分形变相变形迹的类型、序次, 研究形变相变形迹的空间分布规律和组构特征, 借助于先进的测试分析手段研究形变相变形迹中的物理化学信息, 进而反演流体的运动及其与岩石矿物相互作用和构造作用的动力学过程。

收稿日期: 2000-02-23; 修回日期: 2000-12-11.

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目“冀西北钾化蚀变岩中裂理构造的交代成因与控矿作用”(编号: 49802021)资助。

作者简介: 徐兴旺(1966-), 男, 浙江人, 副研究员, 主要从事构造地质、流体构造动力学及隐伏矿床定位预测研究。

E-mail: caixp@igcas.igcas.ac.cn

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

## 2 流体与构造的关系

构造与流体的相互作用是非常复杂和多方面的。岩石矿物的压溶作用和物质再沉淀过程及其对变形的影响就是构造与流体相互作用的典型例子。由压力作用造成矿物接触界面附近物质溶解的压溶作用 (pressure solution) 是岩石形变相变的重要过程<sup>[1]</sup>, 被溶解的物质在岩石-流体系统中通过颗粒边界通道发生扩散迁移<sup>[2,3]</sup>, 压溶作用及物质的再沉淀过程被认为是地壳变形的一种重要的流变机制<sup>[4,5]</sup>, 称为压溶流变 (pressure-solution creep) 或溶解迁移流变 (solution-transfer creep)。Shin izu<sup>[6]</sup> 给出了石英矿物中压溶流变的动力学模型, 他的计算结果显示, 温度在 150、250 和 350 时石英质岩石处于变质状态下压溶流变的应变速率分别为每秒  $10^{-9} \sim 10^{-13}$ 、 $10^{-8} \sim 10^{-11}$  和  $10^{-7} \sim 10^{-11}$ 。

构造对流体的作用可概括为 4 个方面:

(1) 构造带, 特别是断裂构造带, 是流体的主要输导系统<sup>[7]</sup>, 是成矿流体运移的通道 (channel ways) 和矿床定位的有利部位<sup>[8]</sup>。

(2) 在构造应力作用下, 岩石矿物发生各种物理及化学变化, 产生压实、压溶、应力溶蚀 (stress corrosion)、剪切、交代、重结晶等作用, 致使岩石矿物释放出结晶时封存的流体或释放出矿物岩石的结晶水、晶间水和裂隙水<sup>[9-11]</sup>, 杨巍然等 (1996) 将这种由构造应力作用直接形成的流体称为构造流体。例如, 在逆冲推覆构造形成过程中, 强烈的挤压作用将导致下盘地块岩石中孔隙水的挤出并通过剪切带进入上覆推覆体, 通过推覆面的流体量可达  $4 \times 10^9 \text{ gm}^{-2}$ <sup>[12]</sup>。

(3) 构造变形过程, 由于岩石矿物之间的相互作用和反应 (如石英与白云石发生反应形成 Ca-钙硅酸盐矿物如滑石、透闪石、透辉石、直闪石、硅辉石等), 形成一些流体。Tobisch 等<sup>[13]</sup> 对花岗闪长岩向条带状糜棱岩转化过程成分变化的研究表明, 随着韧性变形的增强, 岩石中  $\text{SiO}_2$ 、CaO、FeO、Fe、Sr 不断增加, 而 Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、FeO、MgO 则减少, 岩石中的流体不断增加。

(4) 构造变形导致构造带附近流体发生迁移并进入构造带, 成矿元素于特定的构造部位聚集沉淀成矿。Ledru 等<sup>[8]</sup> 认为剪切变形形成的张性空间和压力影是成矿流体的聚集空间, 成矿物质富集沉淀的机制。Roddy 等<sup>[14]</sup> 研究了美国亚利桑那州 (Arizona) Harcuvar 山区伸展断层内的钾交代作用 (K-

metasomatism) 和矿化作用, 断层内的钾被认为源于断层作用造成其上部盆地海水往下渗透和注入。Newton<sup>[15]</sup> 在讨论深部地壳的流体与剪切带关系时认为: 深部大陆地壳正常情况下是缺失流体的; 在构造作用 (拉张、逆冲推覆和剪切) 过程和构造作用之后, 深部地壳将有大量流体聚集, 并伴生多样的现象, 如麻粒岩相变质作用 (granulite-facies metamorphism)、剪切带碱性花岗岩 (shear zone alkaline granites)、碳酸岩-煌斑岩-正长岩杂岩体 (carbonatite-lamprophyre-syenite complexes) 和不同类型的蚀变作用 (包括区域碳酸盐化、花岗岩化等)。Losh<sup>[16]</sup> 研究了内华达 (Nevada) 地区斯内克岭 (Snake Range) 拆离断层 (detachment) 和 Mormon Peak 伸展断层带稳定同位素和流体特征, 结果显示断层角砾岩、脉体和断层上部弱变形灰岩的氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ ) 组成复杂, 可能成因于伸展断层活动过程断层上部地势较高地区的水往下注入断层并形成快速水流, 或由于地热梯度引起断层上盘水流体对流的结果, 这种对流在变形过程得到强化和稳定, 给出的模型计算出伸展断层活动过程其中流体流的流速为  $1\,700 \sim 11\,000 \text{ kg/cm}^2$ 。即断层活动可导致断层上部岩石中的水注入断层并形成快速流。

## 3 流体构造作用方式

由流体的温度和压力等物理状态及其变化和流体的迁移与运动等物理过程所产生的构造作用, 其作用方式主要有:

(1) 高压流体对围岩的压裂和爆裂作用。Hubbert 等<sup>[17]</sup> 提出的水压致裂理论认为: 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, 这些孔隙范围内岩石的强度系数可能接近于 0; 要保持孔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<sup>[18-30]</sup>, 其成因模式有流化作用 (fluidization)<sup>[31]</sup>、岩浆气化爆破 (phreatomagmatic explosions)<sup>[32]</sup>、能量释放导致的爆破 (explosions induced by energy release)<sup>[33]</sup> 和流体温压双重致裂 (fluids double-fracturing)<sup>[34,35]</sup> 等。角砾岩筒是一些金属和贵金属矿产 (如金刚石、铜、钼、金、银、锡、铀、铅和锌等) 的重要容矿构造。Fyfe 等<sup>[36]</sup> 认为地壳深部高的水压可导致断层的形成。Davies 等<sup>[37]</sup> 认为高

压流体可导致岩石中先存断裂的张开,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时,可使围岩发生变形,形成褶皱和断裂构造<sup>[38, 39]</sup>。钱维宏<sup>[40]</sup>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<sup>[41]</sup>。

(3) 流体及流体压力对岩石变形的影响。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<sup>[42]</sup>。Hobbs<sup>[43]</sup>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<sup>[44]</sup>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 °C 范围内水的孔隙压力对卡拉拉(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<sup>[45]</sup>,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<sup>[15]</sup>。

(5) 流体相变过程体积改变将产生并积聚构造应力,对围岩发生作用并使岩石致裂。如岩浆的结晶过程,液态水的结冰固化都将导致系统体积的膨胀,产生构造应力,形成断裂和节理构造。许多岩浆岩体周边一些断裂构造的形成可能就与此有关。Burnham (1980) 对岩浆熔体结晶过程体积及机械能的变化与断裂强度的关系进行了较系统的研究,结果表明,当含水 2~7% 的花岗质熔体在 2 km 深处全部结晶时,体积将膨胀近 50%,所积聚的内压可高达几千万个 kPa,远大于岩石的强度<sup>[46]</sup>。Mueller 等<sup>[47]</sup>在讨论晶体与熔体的平衡时,也注意到体系相变过程体积的变化,给出了钠长石和钙长石结晶过程体积的变化量为  $9.0 \text{ cm}^3/\text{mol}$  和  $2.5 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 。

(6) 流体的热应力致裂与热干挠作用。流体热应力致裂作用并形成一系列破裂构造,是自然界的一种重要破裂机制<sup>[48]</sup>,近年来已引起许多地质学家的注意。山东七宝山角砾岩筒的形成就与流体热应力的作用密切相关<sup>[34, 35]</sup>。热干挠现象是在研究新疆鄯善县蚂蝗沟金矿床石英脉与其附近的泥质片岩的

关系时发现的,该片理已明显的被挠乱而形成无序的块状体。热干挠的范围和流体与围岩之间热状态的差异程度有关。

由于流体化学组分的加入导致岩石矿物物理性质的变化以及流体与岩石矿物发生化学作用等所引起的构造作用,其作用方式主要有:

(1) 流体与岩石矿物相互作用和变质反应,形成新的易于变形的片状或细粒状矿物,强化岩石的韧性和塑性。Beach<sup>[4]</sup>研究 Scourie 花岗岩中的剪切带时提出,带内定向排列形成片理构造的白云母是长石在水的作用下退变质形成的。Hammer<sup>[49]</sup>在研究 New land 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,指出剪切带中由于  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  加入,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  $\text{SiO}_2$ 。Rubie<sup>[50]</sup>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  $\beta$  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<sup>[50]</sup>。徐兴旺<sup>[51]</sup>将这种粒化作用称为变质粒化。

(2) 流体组分的存在和参与影响岩石矿物的变形机制。Bell<sup>[52]</sup>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,而高的水含量利于漆褶的形成<sup>[52]</sup>。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 等<sup>[53]</sup>在讨论化学环境对应力刻蚀作用影响时,认为环境中  $\text{OH}^-$  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 °C、1 000 MPa 时,由于  $\text{OH}^-$  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<sup>[54]</sup>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<sup>[55]</sup>对岩盐(rock salt)流变实验结果显示,在长时间的流变过程中,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(clinopyroxenite)的变形中也非常明显<sup>[56~ 59]</sup>,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%<sup>[56]</sup>。水解软化

徐兴旺. 北京红螺镇—十三陵逆冲推覆构造的研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学, 1991.

(hydrolytic weakening) 机制主要有 Si-O-Si 键的水解<sup>[56]</sup>、水压造成的物质扩散、氢离子的介入且 (4H) 替代一个 Si 并产生缺陷和 (OH) 的介入造成破裂的形成。Borradaile 等<sup>[60]</sup>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<sup>[60]</sup>。

## 4 流体构造类型与特征

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、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, 岩体往外具有从韧性向脆性、脆性转化和分带的特征<sup>[38]</sup>。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: 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; 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; 中部角砾岩带, 角砾成分为硅质片岩, 角砾多呈长方板状, 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; 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<sup>[28]</sup>。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。流体构造分带性研究对于矿床成矿预测具重要的意义。

## 5 流体构造动力学研究的新进展

近年来, 流体构造动力学的研究取得了一些新的进展, 主要有:

(1) 流体有控压裂理论与技术研究的突破。“八五”期间, 中国科学院地质研究所王杰主持的“大同煤矿坚硬顶板有控压裂放顶理论与技术研究”取得重大突破, 他们的研究成果指出: 水压致裂的开裂方向是可以控制的, 在一定装置控制下形成的有控压裂是水力压力作用克服了最小主应力和岩体抗拉强度之后的脆性张破坏, 有控压裂的开裂方向始终垂直于应力场中的最小主应力的方向, 有控压裂的形成与扩展与岩体中先存破裂构造的产状无关。该研究成果被广泛地应用于煤矿放顶工作, 取得了显著的经济效益。

(2) 流体与岩石矿物发生化学反应作用直接或间接地引起岩石矿物破裂的研究。徐兴旺在冀西北钾化蚀变岩中发现了一套具自身所特有的结构的裂理构造, 并通过对该裂理构造几何学、动力学、组构特征、充填脉地球化学特征、钾交代与裂理构造的时空结构关系及钾交代对交代岩岩石强度的影响等方面的综合研究后, 指出该裂理构造成因于钾交代过程系统体积的膨胀、交代残留流体的体积缩小和内压增加并反作用于围限其的钾长石而使钾长石破裂。

(3) 流体破裂和碎裂的研究。地质学中与之相关的研究刚处于起步阶段。近年来, 火山地质学家对岩浆在火山喷发和爆发过程的碎裂及其影响和制约机制进行了大量的研究工作<sup>[61~73]</sup>, 对基性熔岩在喷流过程与水 and 湿沉积体相互作用时熔岩的破裂和碎裂特征进行了研究<sup>[74~76]</sup>, 并成为一个新的研究热点。1999 年 8 月在英国伯明翰召开的 IUGG 大会为此设立了一个专题讨论(Magma fragmentation and

徐兴旺. 新疆觉罗塔格韧性挤压带形成演化及金矿成矿作用(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院, 1996. 187-197.

中国科学院地质研究所, 煤炭部大同矿务局. 大同煤矿坚硬顶板有控压裂放顶理论与技术研究报告. 1986. 1-89.

徐兴旺. 成矿流体构造动力学研究——以冀西北后沟金矿和山东七宝山为例(博士后出站报告). 1999. 24-38.

explosive eruptive flow s)。

1999 年初, 作者在北衙地区发现岩浆侵入于(古)喀斯特洞穴等一些特殊的地质现象, 其中包括喀斯特洞穴中岩浆的破裂、角砾化和糜棱岩化等现象, 是岩浆在喀斯特洞穴中流动及与水和湿沉积体相互作用过程所产生的特殊构造作用的结果。鉴于岩浆流体在破裂后一定时间内, 破裂体仍保留有一定的塑性, 建议将这种破裂称为塑性破裂, 简称塑裂(fragmentation)。流体破裂构造的形成与和流体相互作用的介质的渗入和分离流体的作用密切相关。

(4) 从成矿流体构造动力学角度开展隐伏矿床定位预测的研究。其基本思路是: 矿床(体)的形成过程是元素迁移、富集的物理化学过程。大部分矿床的成矿作用是在流体体系中进行的, 流体是有用元素迁移的载体, 有用元素是流体体系中的重要组成部分。矿床体是成矿流体运动过程有用元素在某些地方卸载和聚集的产物。流体体系元素的卸载过程是流体运动学和动力学过程的一部分, 其在矿床体所在位置除了留下化学组分形迹的同时, 将在围岩中留下与围岩相互作用的形变相变形迹。我们可以利用围岩中的这些形变相变形迹特征来推断和预测其共生或伴生的矿床体。特别对于一些高温高压流体, 其在减压的环境下卸载成矿, 减压的过程是与围岩相互作用和围岩破裂的过程, 其将在围岩中形成一系列在空间分布上具分带性的流体构造系。我们可以根据这些成矿流体构造的组构及其与矿床体的时配置关系, 即矿床结构模型, 进行隐伏矿床的定位预测。在山东五莲地区隐伏矿床预测找矿工作就是按照上述思路和方法进行的, 取得了较好的效果<sup>[77]</sup>。

## 6 结 论

地质流体是地球内部重要的物质组成之一, 其在地质历史和现今的地壳运动、造山作用及岩石的褶皱和断裂等构造过程起着重要的作用。它不仅是参与者, 而且是重要的组织者之一。流体构造动力学的研究对于我们更好地了解和认识地球、寻找自然资源、预测和防范自然灾害都具有重要的意义。

## 参考文献(References):

- [1] Ramsay J G. Pressure solution—the field data [J]. *Journal of Geological Society*, 1977, 134: 72
- [2] Durney D W. Early theories and hypotheses on pressure-solution-redeposition [J]. *Geology*, 1978, 6: 369-372
- [3] Paterson M S. A theory for granular flow accommodated by material transfer via an intergranular fluid [J]. *Tectono-*

- physics, 1995, 245: 135-151.
- [4] Beach A. Retrogressive metamorphic processes in shear zones with special reference to the Lewisian complex [J]. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2(1-2): 257-263
- [5] Cox S F, Etheridge M A. Couple grain-scale dilatancy and mass transfer during deformation at high fluid pressure: examples from Mount Lyall, Tasmania [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11: 147-162
- [6] Shimizu I. Kinetics of pressure solution creep in quartz: theoretical considerations [J]. *Tectonophysics*, 1995, 245: 121-134
- [7] Xie Xinong, Li Sitian. Fluid flow and dynamic model in fault zones [J]. *Earth Science Frontier*, 1996, 3(3): 145-151. [解习农, 李思田. 断裂带流体作用及动力学模型[J]. *地学前缘*, 1996, 3(3): 145-151.]
- [8] Ledru P, Autran A. Relationships between fluid circulation, ore deposition, and shear zones: new evidence from the Salau Scheelite deposit (French Pyrennes) [J]. *Economic Geology*, 1987, 82: 224-229
- [9] Atkinson B K. Stress corrosion and the rate-dependent tensile failure of a fine-grained quartz rock [J]. *Tectonophysics*, 1980, 65: 281-290
- [10] Knipe R J. The interaction of deformation and metamorphism in slates [J]. *Tectonophysics*, 1981, 78: 249-272
- [11] Burg J P, Leon M I P D. Pressure-solution structures in a granite [J]. *Journal of Structural Geology*, 1985, 7(3): 431-436
- [12] Fyfe W S, Kerrick R. Fluids and thrusting [J]. *Chemical Geology*, 1985, 49: 353-362
- [13] 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 [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(10): 1 137-1 156
- [14] Roddy M, Reynolds S, Smith B, et al. K metasomatism and detachment-related mineralization, Harcarav Mountains, Arizona [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100: 1 627-1 639
- [15] Newton R C. Fluids and shear zones in the deep crust [J]. *Tectonophysics*, 1990, 182: 21-37
- [16] Losh S. Stable isotope and modeling studies of fluid-rock interaction associated with the Snake Range and Mormon Peak detachment faults, Nevada [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, 109(3): 300-323
- [17] Hubbert M K, Rubey W W. Roles of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting [J]. *AAPG Bulletin*, 1959, 70: 167-206
- [18] Bryant D G. Intrusive breccias associated with ore, Warren (Bisbee) Mining District, Arizona [J]. *Economic Geology*, 1968, 63(1): 1-12
- [19] Lambias E J, Malvicini L. Geology and genesis of the Bi-Cu mineralized breccia-pipe, San Francisco de Los Andes, San

- Juan, Argentina[J]. *Economic Geology*, 1969, 64 (3): 271-286
- [20] Norton D L, Cathles L M. Breccia pipes, products of exsolved vapor from magmas [J]. *Economic Geology*, 1973, 68(3): 540-546
- [21] Sharp J E. Cave Peak, a molybdenum mineralized breccia pipe complex in Culberson County, Texas [J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 1979, 74(3): 517-534
- [22] Norman D I, Sawkins F J. The tribag breccia pipes: Precambrian Cu-Mo deposits, Batchawana Bay, Ontario [J]. *Economic Geology*, 1985, 80(5): 1 593-1 621.
- [23] Sillitoe R H. Ore-related breccias in volcanoplutonic areas [J]. *Economic Geology*, 1985, 80(5): 1 467-1 514
- [24] Barker E M, Andrew A S. Geologic, Fluid Inclusion, and Stable Isotope studies of the Gold-Bearing Breccia Pipe at Kidston, Queensland, Australia [J]. *Economic Geology*, 1991, 86: 810-830
- [25] Li Shengyuan. Characteristics and origin of the Gengzhuang subvolcanogene hydrothermal gold deposit [J]. *Geology and Prospecting*, 1988, 24(5): 1-7. [李生元 耿庄次火山热液型金矿的特征与成因[J]. *地质与勘探*, 1988, 24(5): 1-7.]
- [26] Zhang Zengfeng. General features and genetic mechanism of crypto-explosive breccias [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1991, 10(4): 1-5. [张增凤 隐爆角砾岩的特征及其形成机制[J]. *地质科技情报*, 1991, 10(4): 1-5.]
- [27] Zhang Hongtao, Rui Zongyao. On the genetic classification of mineralized breccias related to porphyry deposits and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 1991, 10(3): 265-271. [张洪涛, 芮宗瑶 论与斑岩矿床有关的矿化角砾岩成因类型及其地质意义[J]. *矿床地质*, 1991, 10(3): 265-271.]
- [28] Xu Xingwang, Sun Liqian, Lei Weizhi, *et al*. Structural characteristics, petrogenesis and mineralization of the massive polymetal deposits in Baiyin, Gansu Province, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 1996, 2: 85-94
- [29] Xu Xingwang, Cai Xingpin, Zhang Baolin, *et al*. Tectonic function and mineralization of fluids [J]. *Mineral Deposits*, 1998, 7(Sup): 1 067-1 070. [徐兴旺, 蔡新平, 张宝林, 等. 流体的构造作用与成矿[J]. *矿床地质*, 1998, 7(sup.): 1 067-1 070.]
- [30] Xu Xingwang, Caixinping, Qin Dajun, *et al*. Tectonic dynamic process of ore-forming fluids in the breccia pipe, Qibaoshan, Shandong [J]. *Gold Geology*, 1999, 5(3): 19-27. [徐兴旺, 蔡新平, 秦大军, 等. 山东七宝山角砾岩筒结构和成矿流体构造动力学过程的恢复[J]. *黄金地质*, 1999, 5(3): 19-27.]
- [31] Reynolds D. Fluidization as a geological process, and its bearing on the problem of intrusive granites [J]. *American Journal Sciences*, 1954, 252: 577-613
- [32] Wolfe J A. Fluidization versus phreatomagmatic explosions in breccia pipes [J]. *Economic Geology*, 1980, 75(7): 1 105-1 108
- [33] Burnham C W. Energy release in subvolcanic environments: implications for breccia formation [J]. *Economic Geology*, 1985, 80: 1 515-1 522
- [34] 徐兴旺, 蔡新平, 秦大军, 等. 山东七宝山角砾岩筒流体温压双重致裂机制与金铜成矿[J]. *中国科学(D 辑)*, 2000, 30(1): 47-52
- [35] Xu Xingwang, Cai Xinping, Qin Dajun, *et al*. Fluids double-fracturing genetic mechanism and mineralization of gold-copper of the breccia pipe at Qibaoshan in Shandong Province [J]. *Chinese Science (D)*, 2000, 30(2): 113-121.
- [36] Fyfe W S, Price N J, Thompson A B. Fluids in the Earth's Crust [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978 1-363
- [37] Davies J B, Archambeau C B. Analysis of high-pressure fluid flow in fractures with application to Yucca Mountain, Nevada, slug test data [J]. *Tectonophysics*, 1997, 277: 83-98
- [38] Zheng Y, Wang Y, Liu R, *et al*. Sliding-thrusting tectonics caused by thermal uplift in the Yunnan Mountains, Beikang, China [J]. *Journal of Structural Geology*, 1988, 10(2): 135-144
- [39] Ma Changqian. The magma-dynamic mechanism of emplacement and compositional zonation of the Zhoukoudian stock, Beijing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1988, 62(4): 329-341. [马昌前 北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理[J]. *地质学报*, 1988, 62(4): 329-341.]
- [40] Qian Weihong. The motion of the Earth interior liquid and global tectonics [J]. *Earth Science Frontier*, 1996, 3(3): 152-160. [钱维宏 地球内部流体运动与全球构造[J]. *地学前缘*, 1996, 3(3): 152-160.]
- [41] Sun Xiong, Ma Zongjin, Hong Hanzheng. Preliminary discussion on "Structure fluid dynamics" [J]. *Earth Science Frontier*, 1996, 3(3): 138-144. [孙雄, 马宗晋, 洪汉诤 初论“构造流体动力学”[J]. *地学前缘*, 1996, 3(3): 138-144.]
- [42] Meissner K, Wever R. The possible role of fluids for the structuring of the continental crust [J]. *Earth Science Reviews*, 1992, 32: 19-32
- [43] Hobbs B E. The influence of metamorphic environment up the deformation of minerals [J]. *Tectonophysics*, 1981, 78: 335-383
- [44] Rutter E H. The influence of temperature, strain rate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks [J]. *Tectonophysics*, 1974, 22: 311-334
- [45] Wintsch R P, Christoffersen R, Kronenberg A K. Fluid-rock reaction weakening of fault zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(7): 13 021-13 032
- [46] Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, C.A.S. Ore Deposit Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 1-29. [中国科学院矿床地球化学开发研究实验室 矿床地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 1-29.]
- [47] Mueller R F, Saxena S K. Chemical Petrology [M]. New

- York: Springer-Verlag, 1977. 29-33
- [48] Chen Yong, Wu Xiaodong, Zhang Fuqin. Thermal fracture experiment [J]. Chinese Sciences Bulletin, 1999, 44: 880-883 [陈勇, 吴晓东, 张福勤. 热致裂实验研究[J]. 科学通报, 1999, 44: 880-883.]
- [49] Hammer S K. Segregation bands in plagioclase: non-dilatational quartz veins formed by strain enhanced diffusion [J]. Tectonophysics, 1981, 79: T53-T61.
- [50] Rubie D C. Reaction-enhanced ductility: the role of solid-solid univariant reactions in deformation of the crust and mantle [J]. Tectonophysics, 1983, 96: 331-352
- [51] Xu Xingwang, Li Dongxu. Metamorphic and cataclastic granularization of mineral in ductile shear zone and classification of mylonites in the Huairou area, Beijing [A]. In: Tectonics Symposium Abstracts [C]. 1994. 140-141. [徐兴旺, 李东旭. 北京怀柔地区韧性剪切带中矿物的变质粒化作用、脆性粒化作用及糜棱岩分类 [A]. 见: 大陆构造学术讨论会论文摘要 [C]. 1994. 140-141.]
- [52] Bell T H. The deformation and recrystallization of biotite in the WOODREFFE thrust mylonite zone [J]. Tectonophysics, 1979, 58: 139-158
- [53] Atkinson B K, Meredith P G. Stress corrosion cracking of quartz: a note on the influence of chemical environment [J]. Tectonophysics, 1981, 77: T1-T11.
- [54] Urai J L. Water-enhanced dynamic recrystallization and solution transfer in experimentally deformed carnallite [J]. Tectonophysics, 1985, 120: 285-317.
- [55] Urai J L, Spiers C J, Zwart H J, *et al*. Weakening of rock salt by water during long-term creep [J]. Nature, 1986, 324: 554-557.
- [56] Griggs D T, Blacic J D. Quartz: anomalous weakness of synthetic crystals [J]. Science, 1965, 147: 292-295
- [57] Griggs D T. Hydrolytic weakening of quartz and other silicates [J]. Geophys J R A stron Soc, 1967, 14: 19-31.
- [58] Blacic J D. Effect of water on the experimental deformation of olivine [J]. Am Geophys Union, Geophys Monogr, 1972, 16: 109-115.
- [59] Boland J N, Tullis T E. Deformation behavior of wet and dry clinopyroxenite in the brittle to ductile transition region [A]. In: Hobbs Heard, ed. Geophysical Monograph 36, Mineral and rock deformation: Laboratory studies, the Paterson Volume [C]. American Geophysical Union, Washington, D C, 1986. 35-49.
- [60] Borradaile C J, McArthur J. Experimental calcite fabric in a synthetic weaker aggregate by coaxial and non-coaxial deformation [J]. Journal of Structural Geology, 1990, 12 (3): 351-363
- [61] Freundt A, Rosi M. From Magma to Tephra Modelling Physical Processes of Explosive Volcanic Eruptions [Z]. ELSEVIER, 1999. 1-334
- [62] Woods A, Sparks S, Connor C, *et al*. A Model of the Interaction of a Fissure Eruption with a Horizontal Tunnel [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B169
- [63] Hill B, Connor C, Doubike P. Constraints on Shallow Basaltic Subvolcanic Conduit Dimensions [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B169
- [64] Toramaru A. Thermodynamic and Kinetic Consideration of Magma Fragmentation as a Rarefaction Shock Wave [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B167.
- [65] Melnik O, Sparks S. The Influence of Fragmentation Criterion on Explosive Flow Dynamics in High-viscous Gas-saturated Magmas [Z]. IUGG 99, abstracts, 1999. B167.
- [66] Zimanowski B, Buettner R, Caffier I. The Ash Problem: Hydrodynamic Versus Brittle Fragmentation [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B167.
- [67] Dellino P, Volpe L L. Contrasting Fragmentation and Transportation Dynamics in the Agnano Monte Spina eruption (41 KA) at Phlegrean field (southern Italy) [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B167.
- [68] Buettner R, Zimanowski B, Roeder H. Monitoring of Magma Fragmentation by Electrical Field Measurements [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B168
- [69] Ryang G A, Lane S J, Phillips J C. Fragmentation Behaviour of a Laboratory Analogue to Explosive Magmatic Flows [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B167.
- [70] Taddeucci J, Wohletz K. Magma Fragmentation during the Plinian Phase of the Minoan Eruption (Santorini, Greece), as Inferred by Deposit Features and Pyroclast Textures [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B170
- [71] Ongaro T E, Neri A. Flow Patterns of Overpressured volcanic jets [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B171
- [72] Wada Y. Five Parallel Brecciated Felsic Dikes, Observed at Central Kii Peninsula, SW Japan [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B172
- [73] Papale P. Strain-induced magma fragmentation and Non-equilibrium Flow Dynamics in Volcanic Conduits [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B172
- [74] Colgate S A, Sigurgeisson T. Dynamic mixing of water and lava [J]. Nature, 1973, 224: 252-255.
- [75] Boulter C A, Wilton V M, Cox D J, *et al*. Magma wet-sediment interaction: The most widespread yet least recognized alteration system in the Iberian pyrite belt [A]. In: Stanley C J, *et al*, eds. Mineral Deposits: Processes to Processing (volume 1) [C]. London: A. A. Balkema, 1999. 483-486
- [76] Skilling I. Basaltic Magma Fragmentation Mechanisms within Muddy to Sandy Wet Sediments: A Textural Study of Peperite from Welgessen, South Africa [Z]. IUGG 99, Birmingham, abstracts, 1999. B1679
- [77] Xu Xingwang, Cai Xinping, Liang Guanghe, *et al*. Detailed prediction on position, shape and size of concealed ore-bearing breccia pipes in the subvolcanic complex in Qibaoshan area, Shandong [J]. Gold Science and technology, 1999, 7 (2): 9-18 [徐兴旺, 蔡新平, 梁光河, 等. 山东七宝山次火山

杂岩区隐伏含矿角砾岩筒位-形-域精细预测[J]. 黄金科学

技术, 1999, 7(2): 9-18.]

## TECTONIC DYNAMICS OF FLUIDS AND ITS ADVANCE

XU Xing-wang, CAI Xin-ping, WANG Jie,  
ZHANG Bao-lin, LIANG Guang-he

(*Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** Fluids are important participants and organizers of tectonic processes, such as plate movement, orogenesis, and folding and fracturing of rocks, in geological history and now. It is a time to set up a corresponding subject—"tectonic dynamics of fluids" to improve the study on tectonics of fluids.

Tectonic dynamics is a new interdisciplinary frontier between fluid geology and structural geology. It mainly focuses on structures and tectonic dynamics induced by fluid motion, physical conditions (such as temperature and pressure) and their variation of fluids, and interaction between chemical component of fluids and wall rocks in the crust. It takes features of deformation and metamorphism, which formed during interaction between fluids and rocks and have been preserved in rocks, as basic research objects. After studying types, orders, distributions and fabrics of these features, and analyzing and testing physical and chemical information from these features by some techniques, it is intended to reconstruct moving process of fluids, dynamics of interaction between fluids and rocks, and dynamics of mineralization. The research actualities, such as relationship between fluids and tectonics, tectonic pattern of fluids, and fluidogenous tectonics, have been reviewed, and some advances have been introduced and discussed here.

**Key words:** Fluids; Tectonics; Tectonic dynamics; Tectonics dynamics of fluid