

地下流体与断裂活动关系的研究综述^{*}

王 博, 刘耀炜, 孙小龙

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 总结了近年来国内外关于地下流体与断裂活动关系的主要研究成果。对断裂带特征、断层与流体的相互作用、流体和断层与地震触发模式的关系以及研究方法等方面作了阐述。这些研究成果为我们从新的角度探讨地下流体与断裂活动的关系提供了很好的思路, 同时, 也为我们深入开展地下流体动力学研究奠定了坚实的基础。

关键词: 断裂活动; 地下流体; 耦合模型; 动力学

中图分类号: P315.72⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)03-0296-07

0 引言

近年来, 国内外在地下流体与断裂活动关系的研究方面取得了一系列重要进展。这些成果除了在地震科学领域受到人们的关注外, 在石油地质、构造地质、水文地质等领域也得到了广泛应用。例如, 断裂作用与流体流动耦合的动力学模式在油气运移方面的应用(孙自明等, 2002), 应力场和渗流场的耦合在石油地质勘探中的应用(颜世永等, 2006), 断层带中超压流体在地震和成矿中的应用(刘亮明, 2001), 断层和地下流体在水文地质方面的应用(易立新等, 2004)以及断裂带地温场的研究(白嘉启等, 1998)等。与此同时, 一些新的观点被提出并得到了学术界的认可, 诸如“构造流体动力学”(孙雄等, 1996)、“断层流体动力学”(Rice, 2000)、“地球化学动力学”(於崇文, 1996)等。在地震学领域方面, 尽管研究人员运用多种方法和手段, 如钻孔中流体化学成分、流体包裹体、同位素测定, 以及在野外工作基础上的物理模拟和数值模拟等, 试图解释流体在渗透过程中对断裂带的影响和相互作用机制以及在触发地震方面所起的作用, 但是, 这些研究在取得一定进展的同时也面临着新的问题, 比如断裂带及邻近岩体流体运移及重新分布的机制, 地下流体构造作用机理等。本文在总结前人研究成果的基础上, 主要介绍了断裂带的特

征及分类、断裂带在流体运移中的作用、流体作用对断裂带活动性的影响以及对地震触发作用方面的最新研究进展。

1 断裂带特征

依据断裂带的变形程度以及它们在流体运移过程中所起的不同作用, 人们通常把断裂带结构分为断层核、破裂带以及围岩三部分(Caine等, 1996; Yehuda等, 2003; Gudmundsson等, 2001)。断层核包括断层滑动面以及断层泥、糜棱岩、碎粉岩等断层岩充填部分; 破裂带指断层核外侧断层从属构造, 如次级断层、裂隙、断层褶皱发育带等; 而分布在破裂带外侧的围岩性质基本不变。

Yehuda等(2003)通过对美国南加利福尼亚州几条断层的研究发现, 这些断层的核部宽度很窄, 小断层可能仅有 2~3 m 宽, 大的断层也就 10~20 m 宽。尽管宽度普遍较窄, 核部却吸收了断层的大部分变形。而破裂带规模比起核部来相对较大, 宽度为数百米左右, 但变形程度却相对要低。Heynekamp(1999)指出, 在破裂带中, 小断层、裂隙以及小褶皱等比较发育, 若裂隙发育在断层带核部附近, 其可能被核部的破裂岩、断层泥等截切, 并与后者大角度相交。

对于在岩化程度较低的沉积岩中发育的断层, Heynekamp(1999)提出在断层核和破裂带中间增加混合带这样的观点, 其中, 断层核包括滑动面和厘米尺度的粘土胶结物。由于构造错动混合带中原岩层状结构被破坏, 并在断裂活动中混合了相邻沉

^{*} 收稿日期: 2007-11-28.

基金项目: 国家自然科学基金(40334040和 40474049)资助

积层物质, 结构上从轻微变形到页理化都有。混合带外侧为破裂带, 发育次级断裂和从属褶皱。

基于不同的断裂带结构组成, Caine 等 (1996) 通过对断层附近流体进行野外实验、室内模拟和数值模拟等手段, 进一步得出如下结论: 断层表现为导水通道还是阻水性质或者兼具两种性质主要取决于断层核和破裂带所占的百分比、颗粒大小和断层渗透性结构。据此, 他提出把断裂带分为四类: 局部导水断层带 (SFF)、导水断层带 (DDZ)、局部隔水断层带 (LDZ) 和导水—隔水复合断层带 (CDZ), 它们各自既表示一类特定水文地质性质的断层, 也可以看作是断层构造变形演化过程的一个阶段 (图 1)。

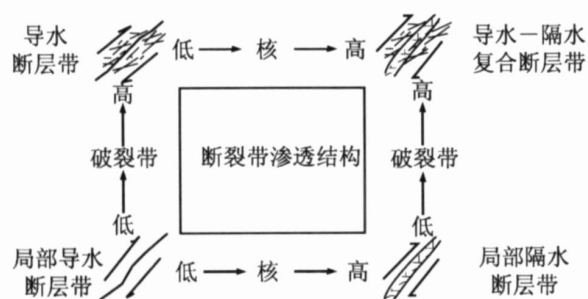


图 1 断裂带导水性质的概念模型 (Caine, 1996)

2 断裂带对流体运移的作用

地壳中的流体主要在断裂带中活动, 断裂带原地的应力状态、断层的倾向、断层岩的各向异性、裂隙的连通性以及被矿物充填的程度等都对流体在断裂带中的运动产生影响 (MuirWood 等, 1993)。Ghiesse 等 (2000) 通过实验发现随着围压的增高, 流体的运移速率降低。但当围压降低时, 流体的运移速率却不能恢复到原先的水平。他进一步研究发现, 围压对断层泥和破裂岩中流体运移速率的影响明显比富含裂隙的碎裂岩要大。

断层既可以成为流体运移的通道, 也可以成为遮挡边界, 这取决于断层是处于开启状态还是封闭状态, 而其状态又取决于断层面上正压力和孔隙压力的关系。童亨茂 (1998) 对此研究指出, 随着异常流体压力系数的增大、构造挤压力的减小和岩石泊松比的减小, 断层的封闭性都会降低, 反之, 封闭性则会增大。同时他还提出了断层封闭系数 I 的概念:

$$I = \sigma_n / P \quad (1)$$

式中, σ_n 为断面上的正压力, P 为流体压力。当 $I > 1.0$ 时, 断层封闭, I 值越大, 封闭程度越高; 当 $I < 1.0$ 时, 断层开启, I 值越小, 开启程度越大。

Moretti 等 (2000) 对断层带的力学性质与流体运移的关系也进行了探讨和研究。他认为, 逆断层及其核部的断层泥对流体的运动起阻挡作用, 导致这些流体与围岩进行比较充分的水岩相互作用, 从而使得该流体的碳、氧同位素含量与围岩相近; 而正断层的作用恰恰相反, 其充当着流体运移的通道, 尤其在地震时, 核部破裂加剧, 导致运移速率加快。但他也认为逆断层并不全是对流体运移起着阻挡作用, 而是和其所处的深度及其温度有关。针对玻利维亚地区的安第斯逆冲断裂带, 他认为温度大于 100°C 、深度大于 3 km 的逆冲断裂对流体的运动起着阻碍作用, 而在该深度以上的逆冲断裂由于构造变形形成裂隙, 且地层以砂岩为主, 因此依然处于开放体系, 流体依然能够向断层的两侧运移。

3 流体作用对断裂带活动性的影响

流体对断裂活动性的影响比较复杂, 主要表现在水岩相互作用导致断裂带强度的变化以及水岩摩擦作用产生的热应力等引起的流体压力的变化对断裂带稳定性的影响, 进而使断裂带失稳, 引发地震。流体在断裂带中的运移不仅可以造成断层带化学性质的变化, 如可能参与形成热液交代矿物、常量元素的改变等, 同时还造成断层岩物理性质的变化, 如断层力学性质、断层带物质成分、渗透性分布特征等的改变 (Tatsuo 等, 2004)。另一方面, 由于水岩长期相互作用, 也可能导致断层岩石强度发生变化 (Wintsch 等, 1995), 表现为断层带强度降低。

在地震平静期, 断层蠕动造成的孔隙压实程度影响着流体压力的大小, 而流体压力的变化又对断层带的有效正应力产生影响。Moretti 等 (2000) 认为, 流体压力 (主要指水压) 的增加使岩体有效正应力减小, 进而可能降低摩擦滑移所必须的抗剪强度, 而应力转移又使剪应力增加, 因此由孔隙流体扩散引起的这两种作用的共同结果使岩体弱化, 不稳定性加强。对于水压致使断

层滑动这种现象，依据哈伯特 (M. K. Hubbert) 和若比 (W. W. Robey) 的孔隙压力理论 (国家地震局科技监测司, 1995)，断层面上的摩擦力为

$$F = F_0 + \mu (P - P_f) \tag{2}$$

式中， F_0 为断层面上岩石之间的粘结力， μ 为摩擦系数， P 为断层面上的正压力， P_f 为孔隙水压力。根据岩石力学中的 Coulomb-Mohr 破裂准则，当断层面上积累的剪切力 τ 大于摩擦力 F 时，断层便发生滑动。

Matha 等 (1996) 也作了相关的研究，认为在流体压力近似于岩石静压力的情况下，地震断层膨胀或蠕动重复发生，可使断层中的饱水裂隙网络缓慢形成，从而逐渐增大断层的持续渗透率。相反地，断层可被动地使流体汇集，导致流体产生并使较弱的断层岩石局部发生水压破裂。同时他还指出，断层周围相互连通的宏观裂隙会增加围岩的压力扩散速率，但这些裂隙只有在流体压力与裂隙法向压力近于相等的情况下才会保持开启状态。

施行觉等 (1986) 用水的扩散作用模式进行了压力注水试验研究后指出，水的扩散效应会使弱化断层的粘滑不稳定。但同时也有学者指出，虽然水能使岩体“软化” (降低强度)，使结构面内的摩擦系数减小 (降低抗滑力)，但水体的自重有可能增加基岩的荷载，从而延缓断层的滑动，所以这些影响相对于岩体自身的强度，均显得微不足道。相对而言，水压在岩体结构面内产生的“孔隙压力”，是一个不可忽视的因素，它可能导致岩体破裂并诱发地震 (颜玉定等, 2005)。

同时，水温的差异对断裂带的作用也是不同的。地下热水参与得愈强烈，水对断裂的弱化作用程度愈高，断裂的滑移幅度也愈大，断裂活动强度随地下水温度高值等值线距离的增大而减弱 (宋贯一等, 2000)。另外，超压流体在地震活动中的作用亦不可忽视 (刘亮明, 2001)，地震断层带中局部存在对其力学和化学过程有着重要影响的超压流体。这种流体超压现象是在断层带中渗透性构造发生强烈时空变化的前提下产生的，其主要原因是构造加压及深源高压流体的注入，当流体压力升至临界值时，致使断层发生灾难性破裂而引发地震。

对于流体引发应力变化导致断层稳定性如何

变化的问题，陆明勇等 (2005) 研究认为，在地震孕育过程的中、短临阶段，随着地下水位的升高，孔隙压力、动水压力也随之变大，造成断层面上的摩擦力减小。同时，由于岩石弱化、强度降低、地下水储量和岩石重量的增加，增强了作用于断层面上的总压力和剪切力，使浅层地壳的断层易于滑动，进而诱发地震的发生。另一方面，若地下水位是下降变化，由于在下降初期岩石已弱化，强度仍然较低，虽然孔隙压力降低了，但动水压力却增加了，所以在水位下降的初期往往可以促使断层滑动，且下降越快、越多，滑动越快、越多。但随着水位下降速度变得缓慢，岩石弱化已明显减退，强度得到增加，孔隙压力明显降低，从而阻止断层滑动。

以上研究分别从不同侧面做出了分析，但对于不同类型的断裂带而言，这种有效正应力和剪应力的变化既可能使该断裂带弱化，也有可能促使其更加稳定。对于正断层和走滑断层来说 (Guillaume 2001)，由流体压力引起的有效正应力和剪应力的变化可能要小于其对逆断层的影响，但是否会造成某类断裂带强度弱化还需要进一步研究。

4 流体、断层与地震的触发模式

在流体对断裂带的弱化以及对地震触发作用的解释上，不同学者提出了不同的看法和模式。

Sibson (1975) 在对热液金属矿与古代断裂破碎带的关系进行研究后，首次提出了“地震泵”这一模式。他指出：这类矿化作用与连通热液矿源较深的古断裂活动有关，并且是多期的、呈幕式发生的。含矿热液的疏导过程为地震所引发，地震发生时断裂的作用就像泵一样，由断裂较深部位“抽出”热液，并沿断面进入上方有较低正应力的张裂隙中。Hooper (1991) 则把这种流体运移机理引用到石油地质领域，认为流体沿生长断裂的向上运移是周期性的，当断裂活动时流体可以集中流动，当断裂不活动时流体流动受到限制。

华保钦 (1995) 对地震泵作用机理进行了探讨，认为由于断层的活动，断层附近应力得到释放，岩石孔隙增大，断层破碎带中流体压力下降，导致围岩中流体向断层运移。阎福礼 (1999) 从微裂隙—裂缝—断层的动态发育过程探讨了“地

震泵”的作用机理,认为在构造活动活跃期,油气在“地震泵”作用下会以混相涌流方式沿断层面快速运移。

与“地震泵”模式对应的还有“断层阀”模式, Cox (1995) 通过对澳大利亚东南部 Wattle Gull 断裂内部构造和与断裂相关岩脉系统的深入研究,认为该断裂的演化涉及到断裂滑动、断裂扩张、热液封闭和空间上相关的流体压裂的产生,而这些现象都是重复性幕式发生的,据此提出“断层阀”作用时期断裂深部的流体与断裂附近围岩中的流体周期性混合、交换和通过断裂向上运移的动力学模式。

Stever 等 (1999) 对此提出了不同的看法,他认为,当高压流体脉冲沿断层上升时,断层带较低的有效应力足以产生瞬时增加的渗透性,流体注入低压储层后,由于压力的降低,断层有效闭合会阻止流体的进一步运移,据此提出了断层“单向阀”作用模式。

Byerlee 等 (1993) 认为,水和断裂带的相互作用使断裂带内部由于矿物成分、构造、温度的变化而形成了相互密隔且具有不同压力的流体室,但随着构造应力的积累,这些流体室的密封壁产生水压破裂,并使被相互分割的流体重新流动。如果两个流体室压力差足够大,这种破裂将触发地震。而 Gok 等认为,来自地壳深部的高压流体使被侵入的岩石地层弱化,并降低内摩擦强度,使水压破裂,导致地震发生。

这些模式从不同方面研究了流体、断层与地震的作用机制,为人们从多角度思考并进一步研究其相互作用提供了很好的思路 and 依据。

5 研究方法及模型

在对断裂带和流体相互作用研究的各种方法中,从耦合的角度去理解地壳运动、断层活动和地下流体动力学变化过程的思想愈来愈受到各国学者的重视。国际上关于耦合场的研究起步较早 (Charlez 1991), 现在已发展至针对核废料处置等的应力场、渗流场与温度场的三场耦合分析的研究。针对具体的研究对象,国内外学者提出了一些相对适用的耦合模型,借鉴这些理论模式及数理模型,将有利于人们客观地理解地震过程中应力应变、地下水位及水温微动态的变化机理。

应力场和渗流场是一个相互影响、相互作用的复杂的统一体。一方面,渗流场的改变引起渗流压力的改变,使作用在介质上的外部荷载发生变化,从而改变了应力场的分布;另一方面,应力场的改变会引起介质空隙率和渗透系数的改变,这样就会引起渗流场的重新分布。

薛世峰等 (2000) 在对岩体和地下流体相互作用耦合场的研究中曾指出这种复杂性,包括物理化学效应、温度效应和表面分子力的影响等。若仅限于从宏观的角度考察岩体与流体的力学耦合作用,则一方面,地下流体对岩体施以静水和动水压力 (孔隙压力),两种压力作用的结果可能使岩体发生劈裂、剪切变形和位移,在裂隙和断层区域还有可能改变岩体间原本稳定的受力环境,引起大范围失稳;另一方面,因其应力-变形状态的改变,岩体的孔隙度和结构面的连通性有可能发生变化,从而对地下流体的运移产生影响。

刘建军等 (2004) 假定在介质中渗流遵从达西定律,且岩体变形为弹性 (或弹塑性) 变形时,基于介质地下流体渗流场与应力场耦合作用的机理,得出应力场与渗流场耦合控制方程

$$\begin{cases} \nabla \cdot \left[\lambda_H(\sigma, P) \nabla P \right] + q_H = \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} \\ (\lambda + G) \mu_{ji} + G \mu_{ji} + F_i + (\alpha P)_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, λ_H 为岩体的传导系数张量函数, $\lambda_H = k_0 \rho / \mu$; 渗透率的表达式可为负指数形式 $k_j = k_0 e^{\beta(\sigma' - \sigma_0')}$, 也可以为直线衰减形式 $k_j = k_0 [1 - \alpha(\sigma' - \sigma_0')]$; k_0 为初始渗透率; λ 为拉梅常数; G 为弹性模量; σ' 为有效应力; P 为孔隙压力; ρ 、 μ 分别为流体密度和粘度; q_H 为渗流源汇项; ϕ 为岩体孔隙度; F_i 为体积力载荷; α 为 Biot 系数; β 为压缩系数。 σ_0' 为初始有效应力; t 为时间。

同时,又因为介质中温度场的分布是以传导和对流为主实现的,而对流则是以地下流体的渗流运动为基础进行的,当岩体中有渗流发生时,地下流体的渗流运动促成了岩体内热能以对流的方式发生转移,进而使岩体内温度场得以重新分布。同时,岩体内温度场的变化,导致地下流体赋存环境 (温度) 的相应变化,岩体的热物理性能发生改变,并通过岩体结构特征的变化而影响了岩体的渗透性能及地下水的渗流特性,发生渗流场的改变。当这两方面的作用达到稳定状态时,

就构成耦合场。据此又得出了温度场和渗流场的连续介质模型

$$\begin{cases} \nabla \cdot \left[\lambda_H(T) \nabla P + D_T \nabla T \right] + q_H = \frac{\partial (\rho(T)\phi)}{\partial t} \\ \nabla \cdot \left[\lambda_T \nabla T - \rho_l \nabla (VT) \right] + q = \phi \frac{\partial T}{\partial t} \end{cases} \quad (4)$$

式中， λ_T 为介质的热传导系数； D_T 为温差作用下的水流扩散率； T 为介质温度； ϕ 、 ρ 分别为介质的比热和密度； ρ_l 和 ρ_l 分别为渗流流体的比热和密度； q 为导热源汇项， V 为流体渗流速度。

在渗流场与温度场耦合研究中，大多数学者将裂隙岩体抽象为连续介质处理，但是对于所研究的断层或者裂隙比较稀疏的情况，采用连续介质的方法将会造成较大的误差甚至得出错误的结论。因此视裂隙岩体为非连续介质，来研究渗流场与温度场之间的相互作用机理就显得非常必要。这方面的研究多数是从单裂隙这个裂隙系统最基本的单元入手，来研究水流对水温的影响机理，通过对这种最简单情况的研究，可以为复杂的裂隙水流温度场的研究提供理论参考，这有利于对裂隙水流温度场的进一步研究，也有利于非连续性裂隙岩体渗流与温度场相互作用关系的研究。

裂隙中的渗流通过与岩体的热量传递影响着温度的分布。裂隙水在裂隙中的运移过程也是裂隙体系内热量发生运移的过程，这种热量的转移必然会引起含水层温度场的扰动（刘建军等，2003）。王如宾等（2005）在忽略岩块本身渗透性的情况下，假定水仅在裂隙内流动且存在单一裂隙，以岩体单裂隙作为研究对象，建立了描述地下水流动状态、流动过程中温度分布的基本方程和单裂隙模型，对单裂隙内渗流速度场、温度场以及渗流影响下的温度分布进行了初步的探索和分析。黄涛（2002）则提出了不同的看法，他主张通过非完全耦合和完全耦合这两种方法来对裂隙岩体渗流—应力—温度场进行研究，其中，非完全耦合作用是将作用于裂隙岩体的应力及温度环境因素视为地下水渗流过程的影响条件，以裂隙岩体中地下水渗流特征为主要研究对象来开展裂隙岩体中地下水渗透规律的研究。而完全耦合是当裂隙岩体内发生地下水的渗流、裂隙结构面的变形及热量的转移（包括热传导、热对流和热辐射）时，在合适的地质环境下产生渗流场、应力场与温度场之间的耦合作用。

罗晓容（1999）简化设计和推导了一个平板断裂开启二维数学模型，通过分析断裂开启后在断裂面及其连通的渗透性地层中流体运移和流体压力的瞬态变化过程，得出了一个反映各个地层和水动力学因素对该过程影响效应的时间特征常数，证明了断裂面的流体传输系数和含水层的水动力传导率分别控制了流经断裂面的峰值流量和保持峰值流量的时间长度，开启断裂造成的地下流体的垂向流动是造成地下热异常的重要原因。

Hamza（2001）则通过一个简单的解析模式计算了在被断层带切断的含水层中由于形变产生的渗流引起的热量瞬时流动。按照这个模型的研究结果，地温升高达到稳定状态的时间与流体的补给率相关；热异常的幅度与弱隔水层的温度梯度有关，弱隔水层与含水层之间的渗透率也起到很重要的作用。研究结果还表明热前兆异常只是在离断层较近的区域表现明显，这是由于在这个区域构造渗流的过程对含水层的水力压头有直接的影响。如果断层面面对形变敏感，应力模式的改变会使构造渗透率发生永久性的改变，从而很容易使区域温度场产生剧烈的、不可恢复的改变。

上述这些模式为研究断裂活动与流体运移以及水温变化的关系提供了很好的研究方法和理论依据，但由于某些参数难以量化，目前断裂活动与流体运移的耦合动力学模式基本上处于定性分析阶段。如何应用和改进这些模式，以便更好地把握断裂活动与地下流体的内在联系，是需要进一步研究的重点问题。

6 结论与讨论

断层可以为地下流体的运移提供良好的通道，同时地下流体又会对断层的活动产生一定的影响，两者是一个相互作用的统一体。虽然对两者关系的研究已经取得了一些成果，但是这些研究还只是停留在宏观或者简单的验证方面。所以，深入开展断层与流体运移关系的研究是当前地下流体力学工作重点。据此，作者提出以下想法：

（1）在断层和流体运移的基础理论方面，对断层渗透结构、流体的循环与展布以及断裂带深、浅部流体运移方面的研究须待加强。譬如，易立新等（2007）提出的断层中震源深度流体的来源问题，由于地下深部渗透率很低，不能解释地下

水向深部的迁移,这就需要从不同深度驱动力的转化方面来考虑。

(2) 在断层及裂隙岩体中的应力场、渗流场、温度场三场耦合方面,应从多尺度的角度对介质渗流特性和温度、变形等相互间的联系进行研究。尽管前人提出了多种数学模型,但由于边界条件及模型参数的难以确定,这些模型往往都被尽可能简化,因此其研究结果不能准确地描述地下流体与断裂活动相互作用的机制。所以,如何更好地确定模型的边界条件、以及如何恰当、合理地划分研究体系中的单元也是关键因素之一。

(3) 地下流体观测井孔一般都布设在断层及其邻近地区,这些观测点出现的水位、水温及化学量的异常变化都有可能与观测含水层相关断层活动性有直接关系,所以需要对一些典型的断裂带进行更详细的野外调查和采样分析,结合实验和数值模拟,提出更加有效的模式来推进地震预报工作。

(4) 苏鹤军等(2006)提出把现今模型的数值模拟与流体演化示踪技术以及化学动力学方法结合起来的设想,这也不失为研究断裂介质中流体运移的一种很好的思路。

参考文献:

- 白嘉启,王小凤,冯向阳. 1998. 郯庐断裂带地温场研究 [J]. 地质力学学报, 4 (1): 78—88.
- 国家地震局科技监测司. 1995. 地震地下水手册 [M]. 北京: 地震出版社: 628—629.
- 华保钦. 1995. 构造应力场,地震泵和油气运移 [J]. 沉积学报, 13 (2): 77—85.
- 黄涛. 2002. 裂隙岩体渗流—应力—温度耦合作用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 21 (1): 77—82.
- 刘建军, 冯夏庭. 2003. 我国油藏渗流—温度—应力耦合的研究进展 [J]. 岩土力学, 24 (增刊 2): 645—650.
- 刘建军, 薛强. 2004. 岩土热—流—固耦合理论及在采矿工程中的应用 [J]. 武汉工业学院学报, 23 (3): 55—60.
- 刘亮明. 2001. 断层带中超压流体及其在地震和成矿中的作用 [J]. 地球科学进展, 16 (2): 238—243.
- 陆明勇, 黄辅琼, 刘善华, 等. 2005. 地壳变形与地下水相互作用及其异常关系初探 [J]. 地震, 25 (1): 67—73.
- 罗晓容. 1999. 断裂开启与地层中温压瞬态变化的数学模拟 [J]. 石油与天然气地质, 2 (1): 1—6.
- 宋贯一, 易立新, 宋晓冰. 2000. 地下热水对断裂活动与地震活动的影响研究 [J]. 地震学报, 22 (6): 632—636.
- 苏鹤军, 刘耀伟, 张慧. 2006. 地球化学动力学方法及其在地下流体地震前兆机理研究中的意义 [J]. 国际地震动态, (2): 12

- 孙雄, 马宗晋, 洪汉净. 1996. 初论“构造流体动力学” [J]. 地质学前沿, 3 (3—4): 138—144.
- 孙自明, 何发歧, 李恩重. 2002. 断裂作用与流体流动耦合动力学研究进展 [J]. 新疆石油地质, 23 (4): 348—350.
- 施行觉 Wang C Y. 1986. 水的扩散与断层的粘滑 [J]. 中国地震, 2 (3): 14—21.
- 童亨茂. 1998. 断层开启与闭合的定量分析 [J]. 石油与天然气地质, 19 (3): 215—220.
- 王如宾, 方涛, 徐维生, 等. 2005. 单裂隙水流稳定温度场初探 [J]. 灾害与防治工程, 59 (2): 44—48.
- 薛世峰, 全兴华, 岳伯谦, 等. 2000. 地下流固耦合理论的研究进展及应用 [J]. 石油大学学报, 24 (2): 109—114.
- 阎福礼, 贾东, 卢华复, 等. 1999. 东营凹陷油气运移的地震泵作用 [J]. 石油与天然气地质, 20 (4): 295—298.
- 颜世永, 李月, 周瑶琪. 2006. 文西断裂带构造特征与油气运聚关系 [J]. 特种油气藏, 13 (4): 35—38.
- 颜玉定, 李亚林, 张专, 等. 2005. 岩石水压致裂和诱发地震的实验研究 [J]. 中国地震, 21 (2): 193—206.
- 易立新, 王广才, 李榴芬. 2004. 水文地质结构与水库诱发地震 [J]. 水文地质工程地质, 31 (2): 29—32.
- 易立新, 刘香, 侯建伟, 等. 2007. 地震研究中的断层流体动力学问题 [J]. 地震, 27 (1): 1—8.
- 於崇文. 1996. 广义地球化学动力学 [J]. 大自然探索, 15 (58): 14—17.
- Bjerve J. 1993. Model for episodic flow of high-pressure water in fault zones before earthquakes [J]. Geology, 21: 303—306.
- Caine J S, Evans J P, Forster C B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure [J]. Geology, 24: 1023—1028.
- Charles P A. 1991. Rock Mechanics [M]. Paris: Editions Technip.
- Chambon G, Rudnicki J W. 2001. Effects of normal stress variations on frictional stability of a fluid-infiltrated fault [M]. American Geophysical Union.
- Cox S F. 1995. Faulting progresses at high fluid pressures: An example of fault valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia [J]. Journal of Geophysical Research, 100 (B7): 12841—12859.
- Ghiesetti F, Kirschner K, Vezzani L. 2000. Tectonic controls on large-scale fluid circulation in the Apennines (Italy) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 69—70: 533—537.
- Gudmundsson A, Berg S, Lysak K B. 2001. Fracture networks and fluid transport in active fault zone [J]. Journal of Structural Geology, 23: 343—353.
- Heynekamp M R. 1999. Controls on fault zone architecture in poorly lithified sediments: Rio Grande Rift, New Mexico: Implications for fault zone permeability and fluid flow [M]. American Geophysical Union, 27—49.
- Hooper E C D. 1991. Fluid migration along faults in compacting sediments [J]. Journal of Petroleum Geology, 14 (2): 161—180.
- Muir Wood R, King G. 1993. Hydrological signatures associated with earthquake strain [J]. JGR, 98: 22035—22068.
- Moretti P, Labaume S, Sheppard L. 2000. Compartmentalisation of fluid flow by thrust faults, Sub-Andean Zone, Bolivia [J]. Jour

nal of Geochemical Exploration 69~70: 493—497.

Mathai S K, Fischer G. 1996. Quantitative modeling of fault fluid discharge and fault dilation induced fluid pressure variations in the seismogenic zone [J]. Geology 24 (2): 183—186.

Rice J R. 2000. New perspectives on crack and fault dynamics [C]. Proceedings of the 20 th international congress of theoretical and applied mechanics.

Sibson 1975. Seismic pumping a hydrothermal fluid transport mechanism [J]. Journal of Geophysical Science 131 (6): 653—660.

Steven L, Lorraine E, Martin S et al. 1999. Vertical and lateral fluid flow related to a large growth fault south Eugene island block 330 field offshore Louisiana [J]. AAPG Bulletin 283 (2): 244—276.

Tatsuo M. 2004. Ken-aro O, Ryuji I. Fracture zone conditions on a recently active fault: insights from mineralogical and geochemical analyses of the Hirabayashi NED drill core on the Nojima fault, southwest Japan, which ruptured in the 1995 Kobe earthquake [J]. Tectonophysics 378: 143—163.

Valiyah M H. 2001. Tectonic leakage of fault bounded aquifers subject to non-isothermal recharge: a mechanism generating thermal precursors to seismic events [J]. Physics of the earth and planetary interiors 126: 163—177.

Wintsch K P, Christoffersen R, Kronenberg A K. 1995. Fluid-rock reaction of fault zones [J]. Journal of Geophysical Research 100: 13021—13032.

Yehuda B Z, Charles G S. 2003. Characterization of fault zone [C]. Yehuda B Z. Pure and Applied Geophysics Seismic Waves and Fault Zone Structure [C]. Springer: 160: 677—715.

Overview: Relationship between Faulting and Underground Fluid

WANG Bo, LU Yao-wei, SUN Xiao-long
(Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China)

Abstract

Based on the researches on the interaction between faulting and underground fluid at home and abroad, we set forth the typical results from several aspects: the characteristics of fault zone, the relation between fault and fluid transport, and the coupled model of them. The results provide us good methods to study from a new angle and also provide the important basic for further research of underground fluid dynamics.

Key words: fault activity; underground fluid; coupled model; dynamics



张 昱 甘肃省地震局高级工程师。1986年毕业于西安地质学院,获工学学士学位。主要从事地下流体地震分析预报等方面的研究。



何案华 中国地震局地壳应力研究所助理研究员。2005年毕业于中国地震局地壳应力研究所,获地球物理硕士学位。主要从事地震前兆仪器的研制和网络技术工作。



史红军 长春市地震局榆树地震监测台工程师。1996年毕业于中国地质大学(北京),主要从事地震监测工作。



王 博 中国地震局地壳应力研究所在读硕士研究生。2005年毕业于聊城大学环境与规划学院,获理学学士学位。现主要从事地震流体动力学与地震分析预报研究工作。



王 军 中国地震局地壳应力研究所在读硕士研究生。主要从事地震前兆数据分析和软件设计工作。



张丽芬 中国地震局武汉地震研究所研究实习员。2003年华东地质学院资源勘查工程专业,获学士学位。2006年毕业于东华理工大学地球化学专业,获硕士学位。参与并承担了多项水库地震相关研究项目,包括国家科技支撑项目、国家自然科学基金项目、地震研究所科技发展基金项目等。主要从事水库诱发地震工作。



夏静瑜 云南大学地球物理系在读硕士,主要从事地球物理学方面的研究工作。