

构造物理化学的研究进展

吕古贤

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081. E-mail: guxianlu@163.net)

摘要 构造物理化学是研究地壳物质受构造作用产生的物理和化学变化相互关联的领域. 构造力可以分解为两部分: 一部分是均应力, 指各向相等的应力, 它叠加在原有压力之上, 并且影响着各种化学反应的平衡, 也是成岩、成矿和变质作用的影响因素; 另一部分是差应力, 受外力作用固体中普遍产生差应力, 它引起地壳物质变形, 产生各种构造形迹. 构造物理化学特别关注构造作用产生或引起的压力、温度及其他的物理化学条件, 研究这些构造附加参量对各种化学平衡的影响, 所以逐渐发展成为独立的学科研究领域.

关键词 构造物理化学 构造附加静水压力 深度校正测算 构造附加参量 构造地球化学 成矿地质事件

构造作用引起地壳物质变形, 产生各种构造形迹, 这是构造地质学所研究的内容. 物质变形, 主要是物理过程, 但构造作用不仅能引起物理变化, 而且还能引起化学变化, 这属于“构造地球化学”研究的内容. 构造地球化学的萌芽始自野外实践, 早期的区域填图发现变质带往往与各种构造单元相关, 近期的研究更证实: 板块碰撞带、缝合带并非简单的构造带, 而是集成岩、成矿和变质作用于一身的复杂物质组合带, 可以认为, 任何构造形迹都伴有一定程度的物质组分迁移.

构造作用能够引起岩石物质成分变化, 从 20 世纪早期就已被关注^[1~3], 但长期以来对其形成机制并没有获得一致认识. 以往的研究以为构造力是定向力, 定向力就是差应力, 设计的实验都试图证明差应力对化学反应的作用, 但没有成功的结果, 以致 Jones^[4]总结道: 如果实验证实化学平衡 P/T 参量的差别依赖于偏差应力的话, 或许要再回到 Harker 应力和反应力矿物的观点的时候了. 构造力与重力一样, 作用于地壳物质都是外力. 外力作用于固体内通常引起三轴应力状态, 这个状态可以看成是一个均压(球形)应力状态叠加一个差应力状态. 这部分球形压力实质上也是影响地球化学过程的压力. 把构造力只看成差应力是不全面的^[5~7]. 地下某处的物质在重力、热力或其他力作用下, 产生一定的应力状态. 当构造力作用时, 又叠加一种应力状态. 叠加后的应力状态也有其均应力部分和差应力部分. 前者即是静水压力(或称围限压力), 能够影响化学平衡, 后者就是差应力, 可以产生岩石变形. 构造物理化学就是通过分解构造力来研究构造引起的物理和化学变化,

以及这些物理和化学变化作用之间的物理化学关系^[8].

1 研究背景

将构造作用与岩石形成及变化联系起来的思想由来已久. 正式用文字表述的应推 Sander^[2] 和 Harker^[1], 他们分别将岩石组构变化和应力矿物的形成归因于构造作用. Niggli^[9]把变质岩相的划分与其所处的温度与压力的环境统一起来. 王嘉荫^[3]运算了矿物之间化学反应中体积变化的压力影响. 李四光^[10]认为, 受力岩石在发生形变的同时也会发生成分变化. 陈国达^[11]在我国组建了最早的大地构造与地球化学研究室(1961), 促进了构造与地球化学相结合的研究. 都城秋穗^[12]提出双变质带概念, 并与板块的动力作用结合起来, 丰富了板块俯冲与变质作用相关的知识. 皮切尔^[13,14]则将花岗岩按构造环境划分出不同的类型, 大大提高了花岗岩的研究水平. 杨开庆^[15,16]细微研究了构造与岩石形变与相变的关系, 提出了“动力成岩成矿”理论. 弗农^[17]出版了有关显微构造与化学物质迁移与分布关系的专著. 张本仁等人^[18]认为区域地球化学体系受控于构造作用所提供的热动力条件, 是物理化学体系的产物. 刘瑞珣^[5]研究了岩石显微构造和矿物晶格变形时的元素和离子迁移. 原苏联学者 Чередниченко^[19]用向外扩散原理分析了褶皱构造与岩浆岩分布的关系, Гзовский^[20]则把物理和化学异常作为深部构造标志, 讨论了大地构造单元和岩浆岩化学成分的关系. Гундобин 等人^[21]研究了断裂带、褶皱带对化学成分变化的影响. 进而 Паталаха^[22]根据褶皱类型和温压条件划分了变质带和相应褶皱类型. 贡恰罗夫等

人^[23]将岩石变形与成分变化概括为“变形-化学共生组合”。对褶皱与物质分布研究的还有一批学者, Roberts^[24], Groshong^[25], Durney^[26]和 Gray 等人^[27]探讨了构造和元素迁移的关系。Parker^[28]认为, 这种迁移与局部压力和浓度有关。Caron 等人^[29]指出褶皱翼部和枢纽带之间有物质迁移, 在 300℃和 800 MPa 条件下, 物质迁移引起的体积变化可达 50%。在热液矿床成因方面, Hemley 等人^[30]用实验证明, 压力梯度对矿化金属的溶解、长距离迁移的影响往往超过温度的作用。Rodriguez^[31]提出了调查隐伏金属矿床的构造化学(tectochemical)方法。此外, 一些学者还从微观角度研究了构造与化学变化的关系: Brodie^[32]探讨了剪切带所伴随的退变质作用; Knipe 等人^[33,34]指出劈理等构造形成中的化学作用; Beach^[35,36]提出的压溶模型考虑了压力与化学势的关系; Vernon^[37], Fyfe^[38]和 Kerrich 等人^[39]都研究了变形与成矿化学过程的关系; Petro 等人^[40]指出挤压性和引张性板块边界对深成岩的化学特征有不同的影响。近 30 年来, 应变测量方法逐渐完善^[41,42], 不仅使不同比例尺的地质构造描绘得更精确, 而且发现了构造与岩石之间具有不可分割的关系。区域构造测量与研究成为区域成岩、成矿和变质作用分析的基础。构造分析已经离不开岩石成分的研究, 反之, 岩石、矿物化石成分的分析也越来越离不开构造环境的研究。

迄今为止, 在构造作用与化学成分关系的探索中还存在一些问题, 涉及如下几方面:

(i) 岩石形变与相变变质相关的动力学机制。正如 Jones^[4]所指出的, 该领域近十几年并未取得实质上的进展^[43~54], 主要是在实验上和理论上还没有提出足够的实际数据资料, 对差应力能影响化学过程的论点给以支持, 却继续证实压力温度(*PT*)仍是化学平衡的基本控制参量。众所周知, 偏斜应力场中的差应力部分才是引起岩石变形的原因, 其各向等正应力不产生岩石形状的改变, 但产生岩石体积的变化。涂光炽在长沙“构造地球化学学术会议”(1983)上指出: 构造与成岩、变质和成矿确有密切的关系, 但就会议和目前的文献来看, 把构造地球化学作为一门学科来提出, 时机还不是很成熟的, 即是说影响那部分伴随岩石形变而发生的岩石相变与变质, 控制这部分相变与变质的地球化学过程的力学机制还没有得到合理的认识 and 解决。

一般认识依然是: 定向压力和偏差应力对于化

学平衡没有直接的影响(只改变岩石的形态), 而静水压力对于化学过程来说是最重要的物理化学变量之一。

(ii) “应力矿物”的力学机制。应力矿物研究^[1~3]、成矿构造研究^[11]和动力成岩成矿研究^[5, 16]等, 首先在形变结合相变领域奠定了地质基础工作, 侧重向人们揭示了大量形变与相变密切共生的地质事实, 还进一步从构造带地球化学特征, 或是说从构造作用力下岩石矿物形成、形变和变质相变过程中元素的迁移富集规律入手, 开展上述现象的成因研究。但事实上, 大量进行的是构造带岩矿地球化学分布特征研究, 还有的人侧重把构造应力的强弱直接与化学元素的重量、大小、性质、性状相联系起来加以探索^[41~44]。然而, 大部分“应力矿物”都可以在静压力状态的实验中合成, 实验还证明应力与成岩成矿的关系不是简单的^[45]。

虽然我们还不能完全清楚详细的过程, 但应力的确对于岩石矿物的形成起到某些作用。我们认为核心问题在于对偏斜应力场要加以分解, 不能一概而论。应力场通常可以分为各向相等(球形)的正应力和偏差应力状态两部分。差应力部分造成受力体的形状变化, 而球形应力部分即通常说的压力则同时控制岩矿的体积变化和形成过程的化学过程。

(iii) 构造强弱不等于流体驱动力大小。研究较多且为人们所注重的是构造对于矿化流体的趋动作用。实际上低黏度液体中仅仅有静水压力, 因此, 把引起构造变形的差应力作为流体的趋动力在这里也遇到了障碍。可以发现, 对于岩石, 构造地质学家^[1,55,56]多数注重于引起岩石形状变化的构造差应力。然而, 他们也都认识到构造作用力产生的偏斜应力场中除差应力之外, 还有各向等应力部分。兰姆赛^[41]把这部分各向等正应力称为“静水应力”, 但同前人一样他也是仅仅把这部分力作为促成岩石体积改变, 即引起物体各向等量变形的物理量而已, 缺乏对这部分力驱动流体运移和平衡地球化学反应的作用的研究。

因此, 要区别对待受构造力而引起物体的两种变形, 才能解释构造对于流体的驱动作用。引起形态变化的差应力不能影响流体, 也不能控制化学过程, 它是一个非独立的变量; 而导致体积改变的等应力状态却不仅影响流体的运移, 而且影响流体内部的静水压力状态, 是一个物理化学变量。

(iv) 依岩石体积变化和平均应力研究矿化流体的运移和成矿机理。王嘉荫^[3]较早利用体积比较法判断构造变质反应的平衡方向。近几年有少数人开始注意到构造应力场中平均应力的作用^[5],如用褶皱部位平均应力不同来推断这些区段岩矿化学组成差异的原因^[17,57],用实测应力及其平均应力来研究斑岩铜矿矿床地质特征和成矿过程^[58]及探讨平面各向等应力对矿液的趋动^[59]的研究。这一部分物理量又被构造物理化学研究者称之为“构造附加静水压力”^[60~64]。

可见,构造作用与岩石化学成分相关性研究,既是形成构造物理化学研究的基础,也蕴含着构造物理化学的发展萌芽。

2 构造物理化学的基本研究思路

在研究形变与变质相关性的领域,当岩石发生构造变形时是什么力学机制引起了相变及变质的发生?这种动力和一般物理化学参量的关系是什么?这种动力的来源仅仅是重力的作用吗?它和构造力的关系怎样?等等,是尚须回答的问题。实际上,这仍然回到了一个重要的理论难题,构造作用力通过什么形式和途径,是怎样影响化学平衡的?

要解决这个问题的途径之一就是把构造产生的压力状态与其他地质作用的压力状态区别开来;进一步讲,就是要研究伴随地质构造力作用而产生的压力、热和其他的物理量,实质上这部分物理量同时又是能影响化学过程的物理化学参量^[60~64]。

尽管从地质环境来看,成矿体系是随时间和空间而变化的。但从某种角度看,控制某些成矿元素运移和沉淀的基本物理化学参数是不变的^[65,66]。此外,形成矿床的任何元素的聚集都需要一个化学运移过程,而这个过程往往必须有流体参与来完成,这个过程又直接受当时物理化学环境条件控制和影响^[67]。因此,如果能够说明物理化学条件受构造作用的制约,如果能从理论、实验和实测数据证实“构造作用力影响静水压力”、“构造作用影响温度条件”等问题^[60,62,68~70],则上述各层次研究所揭示的岩石形变作用与变质相变的地球化学过程密切共生的动力学机制,不同变形带及部位的岩相特征与不同深度的岩相有一定对应性等现象均将得到较合理的解释。据此,作者提出“构造作用力通过控制压力温度和其他物理化学条件来影响成岩成矿地球化学过程”^[8]的

研究思路;实际上深入到了一个新的研究领域,即地质构造作用力与成岩成矿物理化学条件相关性的研究领域,称之为地质构造物理化学或构造物理化学^[8,71];并且指出,它是研究地质构造力的作用下地壳岩石发生物理变化和化学变化相互关系的边缘交叉领域。

3 构造物理化学的主要研究问题

3.1 关于构造附加静水压力问题

固体力学认为,对于固态地壳岩石,特别是中浅地壳,无论重力还是构造力都是有方向性的各向不均衡外力,它们一般(在 $10^8 \sim 10^6$ a 时间尺度内)都引起偏斜应力场。偏应力($\bar{\sigma}$)场的差应力($\bar{\sigma}'$)部分只能引起固体变形^[5,71],偏应力张量中的各向等正压应力($\bar{P}$)部分,相当于平均应力,被形象地称之为“静水压力”的部分则引起固体体积改变。静水压力就是引起物体各向等量变形的各向等正压应力的一般概念。

地壳中的静水压力主要来自构造力引起应力场和重力引起应力场中的两部分各向等正压应力^[64,70],两者可以分别被称为构造附加静水压力(P_s)和重力附加静水压力(P_G)。构造作用力产生的部分静水压力改变受力岩石的静水压力或围压状态。

此外,理论、数学模拟和实测资料还表明,同一外力作用下,挤压变形带(P_C)、压剪变形带(P_S)和引张变形带(P_T)中岩石承受的构造附加静水压力不同^[61]。在弹性阶段, $|P_C| > |P_S| > |P_T|$,且经验公式证明,构造附加静水压力的大小与外力的绝对值和不同方向外力的差值相关。经验公式如下:

$$P_C^S = -0.073 + 0.014\alpha + 0.32X + 0.451\alpha X - 0.002\alpha^2,$$

$$P_{sh}^S = 0.005 - 0.011\alpha + 0.389X + 0.389\alpha X - 0.002\alpha^2,$$

$$P_T^S = -0.182 + 0.142\alpha + 0.441X + 0.337\alpha X - 0.02\alpha^2.$$

构造附加静水压力是个重要的理论问题,也有很广泛的应用前景。然而,尽管从力学上相当于平均应力的量早已为人们所认识^[6],现在又从地质理论上概括出其引起岩石的体积变化,但是在实际上很难区分出构造附加静水压力,主要原因是没有比较的标准。就是说,岩石发生体积变化前的情况比较难掌握,没有对比的基础。在野外露头上如何测量计算出这部分量,也还有很大的难度。并且,目前所测的构造附加静水压力是在一定力学假设前提下获得的^[60~64]。往往用线弹性的假设去计算塑性变形的岩石,因而这种估算所得的压力值不是很精确的。

3.2 关于构造作用影响温度(热)及其成岩成矿问题

岩石在构造应力作用下相互运动,产生位移和变形.按照能量守恒原理,其机械能可能转变为其他形式的能量,部分转化为热能,会引起受力物体的温度变化,可称之为构造热问题.

把构造热问题初步分为三类^[7,8]:构造变形热^[68]、构造摩擦热^[69]和受构造影响的传导热过程^[72],把不同构造变形局部发生的温度差别作为研究的基本目标和途径.

构造活动经常伴有岩石的脆性破裂和变形,这些岩石的变形增加了岩石的应变能.岩石破裂增加了岩石表面积^[69],大大扩大了表面能.裂面之间的摩擦也会产生热能.岩石的能量除了产生声响、光电效应和位移功之外,大部分能量都可能以热的形式散发在岩石中,因为岩石大多数是不良导热体,所以能够影响岩石的局部温度场效应.

刘瑞珣^[5]计算1 cm³花岗岩拉应变变量最大弹性应变能($\sigma_0^2/2E$)是 2.5×10^{-4} J,而只要破碎的粒度降低,则新增加的表面能就可以大大超过同体积岩石的最大弹性应变能.取石英为例,粒度如果由0.1 cm破碎到0.01 cm,则表面能增大达 2.7×10^{-2} J,这个数字约高于花岗岩的最大拉伸弹性应变能100倍.

Wilkins等人^[70]所得出的滑脱断层相邻的岩石中的温度值为200~325℃.考虑用氧同位素研究时估测滑脱断层附近岩石温度为:断层上盘,150~250℃;断层中盘,220~300℃;滑脱断面,300~350℃,认为这些温度同变质核杂岩滑脱断层有关,并影响Au, Ag, Cu, Fe和Mn矿床的流体包裹体盐度及均一化温度等成矿条件.

这种解释意味着在亚利桑那州西部至加利福尼亚东南地壳中,在滑脱断层作用期间发生了广泛的热事件.结果表明,这些与滑脱断层有关的矿化热液流体是断层活动期间从同造山期盆地中排挤出去的,且矿化卤水沿断层活动相反的方向迁移,其初始温度是通过下盘岩石的余热和断层摩擦生成的热来维持并增补的.构造作用产生热液流体并因此发生了相应的矿化.

3.3 构造作用下岩石物理性质的变化

科拉深钻孔岩石的物理实验表明,由于压力的作用岩石不仅发生变形,其岩石物理性质方面也发生变化^[71~73].如岩石的密度、孔隙度^[74,75]、光电磁反

应等,前苏联学者对此都进行了较广泛的研究.

实验岩石学^[76,77]表明,在高温高压地幔转换带内富石榴子石的流变强度大大高于相邻深度的其他矿物相,因而高温高压是导致地幔转换带岩石流变非均匀性的重要条件.

人们对深部岩石的强度有不同的考虑.普通岩石的单轴抗剪强度,大约小于0.5 GPa^[77~79],但是,深部岩石恰恰不是处于单轴应力作用条件下,而是处在很大的围压下或三轴应力条件下.围压越大,矿物的抗剪、抗拉强度越高,而其抗压强度在持续增高围压的条件下几乎是无限的^[80,81].Handing^[81]对于辉长岩的实验证明,在 $T = 500^\circ\text{C}$,围限压达505 MPa情况下,随着应变率增加 $[(1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 10)\%]$ 及差应力变大,辉长岩的强度逐渐增大,248 MPa $\rightarrow$ 400 MPa $\rightarrow$ 625 MPa $\rightarrow$ 809 MPa,最终强度可达817 MPa.所以,组成榴辉岩的矿物可以在3 GPa甚至更高压力下仍不破裂^[77,78].事实上,既然能测出0.5 GPa左右的差应力就说明那里岩石能够承受这一应力作用,发生塑性变形而不破裂^[76].

有人研究岩石抗压性的时候,缺乏考虑围限压力的作用;往往混淆了主应力、应力差或差应力与各向等压应力的区别,把差值的大小等同于球应力绝对值的大小^[7,82].这就难以精确深入地探讨岩石物理性质变化的机制.

3.4 构造作用对地质相图,即地球化学过程PT参量的影响

众所周知,如果体系的物理化学条件改变了,特别是PT条件改变了,它的化学平衡过程也会发生变化,化学成分在各岩石中的分布情况也会随之发生变化^[83,84].因此,当构造作用对于地壳中的压力以及温度产生重要的影响,有关地球化学反应PT平衡参数的问题则有了一个新的受构造控制的解释^[61~63].

在构造物理化学研究中,压力温度状态不仅是指由于地质体所处地壳深浅、所处地质作用(如岩浆或变质作用)位置而具有的温压状态,而且包括由于构造附加参量所引起的温压状态.就一般的地质环境而言,地壳中的温压主要来自上覆岩石的重力和水平方向的构造力.如果我们研究的体系大体位于同样的地壳深处和相近的地质作用空间位置,则不同构造部位的温压状态就是体系相状态和相变化的主要因素了.因此,要开展构造对地质相图影响的特

征和规律研究^[8]。

3.5 构造应力场转化与流体浓缩-稀释耦合成矿问题

构造应力场转化与流体浓缩-稀释耦合成矿作用, 是基于野外地质与室内测试资料分析所提出的一个重要问题^[85,86]。最基础的地质事实是, 矿带的延伸往往受压剪带控制, 而其中的矿石的组构却表明是在张剪构造空间中形成的。研究提出构造应力场转化与界面成矿机制; 热液活动形成交代蚀变岩的后期, 构造应力场最大主压应力高发生近乎于 90° 的转变^[86~89], 引起含矿热液的交代充填及成矿作用; 指出了热液矿床具有在剪压体制下以物质活化及大量交换运移为特色, 转化为剪张体制, 而且有热液析出并在适宜的构造物理化学界面带成矿的演化特征; 大型热液矿床的热液蚀变矿化伴有强烈的流体浓缩作用^[88]; 初始浓度较稀薄的含矿流体, 通过水岩反应生成大量富水矿物的交代带而使得热液中自由水大规模地缩减, 并且自由水通过与 C, S 等组分的反应也被大量消耗; 流体的减压沸腾又促进成矿热液中自由水的减少, 从而使残余流体中金属浓度增高, 同时构造应力场转化为引张特征的耦合作用致使新的低浓度流体加入, 造成饱和流体的稀释和电解性质的改变, 这样流体的浓缩与稀释交替作用促使金属硫化物的反复沉淀。

3.6 构造变形岩相形迹填图及构造变形岩相型式研究

在地壳物质的组成变化和形态变化相交叉的研究领域, 必须形成一些基本的地质实体概念, 这些概念既应该涵盖上述两方面的状态, 又要适应于室内外, 特别是野外实际地质工作的可操作性。以往的构造地球化学研究缺乏野外地质填图的实用方法^[52~54]。在“形变”和“形质”概念^[8]基础上, 本研究提出并应用了构造变形岩相的概念^[89,90], 构造变形岩相形迹是能反映构造作用下地壳岩石物质变形和相伴变质及岩相特征的地质实体。在不同的地质背景和不同研究尺度之中构造变形岩相形迹的具体涵义有差别, 但是, 立足于构造变形力学而且渗透于基本的地质作用(沉积、岩浆和变质等)过程之中这两点是不变的、稳定的。构造变形岩相形迹与构造变形岩相型式的概念及其填图是开展构造物理化学研究的野外地质工作基础, 有可能形成一种岩石结构结合成

分的成矿事件填图方法^[88,89]。

4 构造物理化学的应用领域和前景

4.1 地壳异常压力和地壳深部压力状态

构造物理化学的研究可以促进对地壳深部压力状态的深入了解。随着高精度地球物理资料的不断涌现, 地球深部非均一性的问题业已得到了广泛的认可^[90]。众所周知, 如果重力是地壳中压力的唯一来源的话, 那么在同一深处平面上, 压力值应该相等, 因而是一种静态的压力状态, 相当于静流体状态, 符合于 Pascal 原理, 又称之为“正常压力”。而当考虑构造作用力也是地壳静压力来源之一, 且用固体应力状态为依据去认识地下应力状态的时候^[91~93], 就会发现有许多地壳“异常压力”地段, 并将得到一个受扰动的静水压力等值面, 也就是说, 在同一水平面上, 各处静水压力值是不相等的^[7,64]。根据理论分析与实验研究, 往往受构造挤压力较强区段的静水压力值大于发生拉张区段的值^[40]。

按受构造扰动地壳深部压力状态来看, 地壳中某点的静水压力不仅与上覆岩石密度及其所处深度有关, 而且与它所处的构造受力状况和受热状况有关。由此, 地壳中静水压力等值面近于层状静态分布的模型或许要让位于一个受构造扰动的、因而在同一水平深度上并不相等的准层状静水压力状态, 我们可以称之为地壳压力等值面的异常或畸变^[7]。

4.2 “构造附加静水压力”对油气的驱动问题

油气的远距离水平运移是已经确认的现象, 但是它的动力学机制一直用重力与浮力的差值加以解释; 另外, 关于过剩压力^[95,94]——又称超压的来源问题目前还处于探讨阶段, 因而油气水平运移的动力机制也须进一步研究。

油气运移的方向取决于某一方向的过剩压力梯度与渗透率之比, 在纵向过剩压力梯度大的地区, 油气可能以纵向运移为主, 而在纵向过剩压力梯度小且储层渗透率较好的地区则以横向运移为主。无论在横向或纵向上, 油气在过剩压差作用下都是从过剩压力相对高的部位向较低的部位运移, 然后在压力梯度低的部位富集。例如, 陕甘宁盆地庆华地区 B6 井区长 3 油层在北部形成一个向西南方向突降的低值区, 油气从四周向低值区中心运移, 形成局部富集带。南部一带也形成一个极有利的向心式低值区而接受四周的油气的运移。上述两区已经勘探获得了

高产油流^[95]。

除了岩性之外,这部分过剩压力主要是由局部构造造成的,是构造附加静水压力驱动油气的水平运移和富集。

莺歌海油气盆地的“超压囊”现象揭示,有些油气盆地压力系数可达 1.2~1.4,压力等值面相差标高高达 1000~2000 m^[96]。用“正常压力”或“重力是静水压力惟一来源”的解释难以理解这些事实。这种相同地壳深处压力并不相等的原因或许正是构造附加静水压力(或张力)作用的结果。就是说,构造附加压力是过剩压力的主要来源之一,不同构造局部构造附加静水压力的差别是过剩压力梯度出现的主要原因,构造附加静水压力叠加在相变力^[83,97]和重力产生的静压力之上,是产生过剩压力的重要条件。不同应力状态下地层渗透系数的变化及其对流体运移影响的数值模型可以把这一状态反映出来^[74,75]。因而构造附加静水压力可能是油气长距离水平运移的主要驱动力。

4.3 成矿深度的构造校正测算和隐伏矿床预测

构造物理化学研究,构造影响成岩成矿温压状态的研究,对一些地质观念和技术方法提出了新的研究思路 and 解决途径。成矿深度的构造校正测算即是一例^[7,71,98]。

目前广为采用的成矿深度估算方法是将压力作为上覆岩石重量,而且认为压力是深度的线性函数,然后通过岩石比重换算深度,可简称为压力/比重(W/SW)方法。然而,当考虑到构造附加静水压力时,可以建立新的成矿深度研究测算方法,称为“深度测算的构造校正方法”。这种方法是先从所测算的压力中消除构造附加静水压力值之后再用品重换算深度。

例如,用压力/比重方法估算,前人依据测到 90~150 MPa 的压力,建立了胶东金矿脉分布的垂直分带模型,认为胶东玲珑金矿田和焦家金矿田形成于 4~6 km 或更深^[99],属中深成矿,现在矿体被剥蚀的深度已经很大,深部远景不很乐观。而经构造校正测算

的结果第一次表明,胶东玲珑-焦家式金矿^[63,64,71,78]成矿深度离地表仅 1000~3500 m,且集中于 2500 m 左右深处成矿,大部分矿体未受剥蚀。这一结果指出,胶东地区玲珑-焦家式金矿属于中浅成矿床。那么,这类大型矿山目前正在开采的地段属浅成矿床的上部,因此已经开采、特别是已经剥蚀掉的矿脉较少,主要矿量尚在深部,深部发育金矿第二富集带,因而深部资源远景是乐观的^{[98]1,2)}。经过近十几年勘探队和矿山地质队的钻探,该区深部第二富集带逐渐被揭露,业已求得数百吨的新增储量,深部储量大于浅部并且大部分矿脉深部尚未封口^{3~5)}。可见,上述认识是符合该区实际情况的。成矿深度构造校正测算不仅有理论意义,而且有实际应用价值。

根据胶东地质找矿进展以及相似成矿环境对比,常印佛和翟裕生等人认为可以将构造物理化学这一方法应用于长江中下游矿集区寻找金属矿床深部的第二富集带。广而言之,提出中国东部环太平洋金属成矿带的深部可能存在金属矿化第二富集带的远景意见⁶⁾。

4.4 重新认识超高压变质带的形成深度及成因问题

变质岩带形成深度的数据,目前也是采用压力/比重法估算的。大别-苏鲁高压变质带由于发育大量的与陆-陆碰撞造山过程有关的榴辉岩以及岩石中发现有柯石英和金刚石而引起广泛的重视。金刚石、柯石英、绿辉石等矿物的形成压力大约需要 5~2 GPa(及相应温度)^[82,100,101]。然而,直接断定变质岩形成于 100~200 km 深处并折返于地表的认知值得商榷^{[7,82,83,102,103] 7)}。

以“构造附加静水压力”为基础,用构造校正测算方法^[62,102],已经实测出大别地区英山县北超高压带中的含柯石英榴辉岩形成深度可能仅为 32 km,而不是 100 km 或更深。这能更好地认识超高压带深俯冲-拆返模式中有关同位素^[104]和岩石学^[105]等方面的问题。

英山县的超高压变质带含柯石英榴辉岩可能发

- 1) 孔庆存. 玲珑金矿田构造成岩成矿研究新进展. 玲珑科技, 1999, 3 期
- 2) 孙景运. 评审意见. 山东冶金地勘局四队. 1994; 赵伦山. 评审意见. 中国地质大学. 1994
- 3) 新城金矿等. 深部预测报告. 1993
- 4) 山东省玲珑黄金集团矿业公司. 反馈意见. 1993
- 5) 山东省焦家金矿地测处. 焦家金矿反馈意见. 1998
- 6) 国土资源部办公厅. 中国东部金属矿山深部普遍存在第二富集带初步被证实. 1999
- 7) 周永胜, 何昌荣, 马胜利, 等. 差应力在超高压变质岩形成过程中的作用——来自石英-柯石英转化的高温高压实验证据. 地震地质, 2002 (印刷中)

育在 30 多公里深的地壳深处,与两大陆块之间强烈的构造挤压作用产生的构造附加静水压力有关,致使局部地段达到高压超高压相变的 *PT* 条件,特别是 $P\geq 2.8$ GPa 的变质压力.可以说,这些超高压变质岩是构造叠加于重力压力条件之上的构造物理化学环境的产物^[62,4,83,102,106].

只要自然科学在思维着,它的发展形式就是一个假说.一个新的事实被观察到了,它使得过去用来说明和它同类的事实的方式不中用了,从这一瞬间起,就需要新的说明方式了——它最初仅仅以有限数量的事实和观察为基础,进一步的观察材料会使这些假说纯化,取消一些、修正一些,直到最后纯粹地构成定律.构造物理化学的产生遵循着这一规律,它的深化与发展也应该这样.

致谢 这一系列研究早期曾有杨开庆、孔庆存、孙振左、孙之夫、张文江、武际春、刘永堂参加.本文的许多内容还来自国家计委科技找矿项目(JG947110),国家科委项目(GJ94-83)及其专题成果.李晓波、林文蔚、倪师军、邓军、周绍东、罗元华、曹志敏、张均、陈守余、赖旭龙、冯庆来、王义强、文锦明、郭涛、郭初笋、舒斌、鲁安怀、朱大岗、张成江、孙之夫、丁益民、修瑞芝、孙雄、邱小平、王红才和殷秀兰等人承担完成了大量室内外工作.对郭文魁、孙殿卿、宋叔和、杨开庆、陈庆宣、张炳熹、沈其韩、李廷栋、马宗晋、马瑾、谢学锦、常印佛、陈毓川、任纪舜、翟裕生、叶大年、欧阳自远、杨敏之、崔盛芹、肖庆辉、刘瑞珣、高执棣、李九玲等师长多年的指导与帮助,在此表示衷心的感谢.本工作受国土资源部科技发展计划项目(2002201)、国家计委科技找矿项目(JG947110)、国家科委基础研究特别支持项目(GJ94-83)、地质调查项目(20023046)、国家攀登项目(G1999043214)和(95-39 预-6-3)的支持,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

1 Harker A, 著. 变质作用—岩石转变的研究. 蒋荫昌, 译. 北京: 地质出版社, 1981. 1~373

2 Sander B. Gefugekunde der Gesteine, Berlin. Spring-Verlag, 1930. 641

3 王嘉荫. 应力矿物概论. 北京: 地质出版社, 1978. 1~238

4 Jones M E The relationships between metamorphism and deformation of rock. J Struct Geol, 1981, 3(3): 333~338

5 刘瑞珣. 显微构造地质学. 北京: 北京大学出版社, 1988. 1~235

6 王仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础. 北京: 地质出版社, 1979. 1~379

7 吕古贤, 刘瑞珣. 成岩深度测算原理的探讨. 科学通报, 1999,

44(21): 2350~2352

8 吕古贤. 构造物理化学的初步探讨. 中国区域地质, 1991, (3): 254~261

9 Niggli P. Rocks and Mineral Deposits. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1954. 1~559

10 李四光. 关于改进构造地质工作的几点意见, 全国第一届构造地质专业会议上的总结发言. 地质论评, 1965, 23(4): 245~247

11 陈国达. 成矿构造研究法. 北京: 地质出版社, 1978. 1~413

12 都城秋穗, 著. 变质作用与变质带. 周云生, 译. 北京: 地质出版社, 1979. 1~492

13 皮切尔 W S. 刘浩龙译. 多内加尔花岗岩的形状和岩浆的成因. 国外地质科技, 1984, (3): 111~123

14 皮切尔 W S. 唐连江译. 花岗岩的类型和构造环境. 国外地质科技, 1984, (3): 1~27

15 杨开庆. 关于构造控岩控矿与构造成岩成矿问题. 地质力学论丛, 1982, (6): 9~19

16 杨开庆. 动力成岩成矿理论的研究内容和方向. 见: 中国地质科学院地质力学研究所所刊(7). 北京: 地质出版社, 1986. 1~14

17 弗农 R H, 著. 变质反应与显微构造. 游振东, 王仁民等译. 北京: 地质出版社, 1983. 1~220

18 张本仁, 骆庭川, 高山, 等. 秦巴岩石圈构造及成矿规模地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 446

19 Чередниченко А И. Законмерности размещения кристаллических пород, связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Киев: Наукова, 1979. 345~350

20 Гзовский М В. Основы тектонофизики. Москва: Наука, 1975. 353

21 Гундобин Г М, Богатырев П В. К вопросу о необходимости геохимического изучения зон разломов, Геол и Геофиз, 1975, (1): 58~66

22 Паталаха Е И. Тектонофашиальный алализ-возникновение и развитие. 1. Изв. АН КазССР, Сер. геол, 1986, (6): 12~19

23 贡恰罗夫 М А, 达利斯基 В Г, 戈尔金 В А, 等. 变形-化学共生组合与构造-变质分带. 国外地质科技, 1996, 3: 48~53

24 Roberts J L. The formation of similar folds by inhomogeneous plastic strain, with reference to the fourth phase of deformation affecting the Dalradian rocks in the southwest Highlands of Scotland. J Geol, 1966, 74: 831~855

25 Groshong R H. Strain, fracture and pressure solution in natural single fold. Bull Geol Soc Am, 1975, 86(10): 1363~1376

26 Durney D W. Early theories and hypotheses on pressure-solution-redeposition. Geology, 1978, 6: 369~372

27 Gray D R, Durney D W. Crenulation cleavage differentiation; implication of solution-deposition processes. J Struct Geol, 1979, 11(1): 73~80

- 28 Parker R B. Major element distribution in fold granulite-faces rocks. *Geol Soc Amer Bull*, 1975, 85(1): 11~14
- 29 Caron J M, Potdevin J L, Sicard E. Solution-deposition processes and mass transfer in the deformation of a minor fold. *Tectonophysics*, 1987, 35(1-3): 77~86
- 30 Hemley J J, Cygan G L, d'Angelo W M. Effect of Pressure on ore mineral solubilities under hydrothermal conditions. *Geology*, 1986, 14: 377~379
- 31 Rodriguez S E. Tectochemical investigation applied to exploration for hidden ore deposits, 24th IGC, Section 10. 1972
- 32 Brodie K H. Variations in mineral chemistry across a shear zone in phlogopite peridotite. *J Struct Geol*, 1980, 2(1-2): 265~272
- 33 Knipe C C. Chemical changes during slaty cleavage development. *Bull Miner*, 1979, 102: 206~220
- 34 Knipe R J, White S H. Deformation in low grade shear zones in the old Red Sandstone, S. W. Wales. *J Struct Geol*, 1979, 1(1): 53~66
- 35 Beach A. A geochemical investigation of pressure solution and the formation of veins in a deformed graywacke. *Contr Miner Petrol*, 1974, 46: 61~68
- 36 Beach A. Pressure solution as a metamorphic process deformed terrigenous sedimentary rocks. *Lithos*, 1979, 12: 51~58
- 37 Vernon R H. Controls of mylonitic compositional layering during non-cataclastic, ductile deformation. *Geol Mag*, 1974, 111: 121~123
- 38 Fyfe W S. Chemical aspects of rock deformation. *Phil, Trans R Soc*, 1976, 283: 221~228
- 39 Kerrich R. Geochemistry of gold deposits in the Abitibi Greenstone Belt, Special volume 27, The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1983. 75
- 40 Petro W I, Vogal T A, Wiband J T. Major element chemistry of plutonic rocks suites from compressional and extensional plate boundaries. *Chemical Geology*, 1979, 26(3-4): 217~235
- 41 兰姆赛 J G, 著. 岩石的褶皱作用和断裂作用. 单文琅, 宋鸿林, 蒋荫昌, 译. 北京: 地质出版社, 1985. 1~387
- 42 Ramsay J G. Shear geometry: A review. *J Struct Geol*, 1980, 2: 83~99
- 43 张治洮, 张开春, 李书庆. 磁海矿区构造及旋卷动力分异现象的初步分析. 见: 地质力学文集(6), 北京: 地质出版社, 1982. 58~70
- 44 张治洮. 动力分异及其在成岩成矿作用上的意义. 见: 中国地质科学院地质力学研究所所刊(7), 1986: 129~140
- 45 刘泉清. 构造地球化学的研究及应用. 地质与勘探, 1981, (4): 53~61
- 46 黄瑞华. 我国东部地槽阶段与地洼阶段的地球化学比较. 地质论评, 1981, (6): 520~527
- 47 赵寅震. 同成矿应力场与矿床形成、分布的关系. 见: 地质力学文集(9). 北京: 地质出版社, 1989. 33~46
- 48 刘迅. 江西武山铜矿田块状硫化物矿床的构造控矿机制及地球化学特征. 地质学报, 1990, (1): 22~32
- 49 尹华仁. 构造带的地球化学特征. 见: 地质力学文集(7). 北京: 地质出版社, 1988. 108~119
- 50 丁喧. 浅谈构造地球化学问题. 地质地球化学, 1975, (3): 1~3
- 51 万汉钟. 定向压力对岩体及其矿物的影响. 中国区域地质, 1982, (1): 131~137
- 52 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. 246
- 53 吴学益, 陈副明, 杨柏林, 等. 广东某矿田构造地球化学特征. 见: 地质力学文集(7). 北京: 地质出版社, 1988. 93~107
- 54 杨国清. 构造地球化学. 南宁: 广西师范大学出版社, 1990. 1~119
- 55 毕令斯 M P, 著. 构造地质学. 张炳熹等译. 北京: 地质出版社, 1959. 1~540
- 56 Cloos E. Lineation, A critical review and annotated bibliography. *Mem Geol Soc Amer*, 1946, (18): 122
- 57 Carpenter J R. Apparent retrograde metamorphism: another example of the influence of structural deformation on metamorphic differentiations *Contr. Miner Petrol*, 1968, 17: 173~186
- 58 西胁亲雄. 金昌斗译. 构造应力与斑岩铜矿形成作用的关系. 国外地质科技, 1985, (6): 97~111
- 59 周济元, 余祖成, 毛玉元, 等. 动力驱动矿液运移的若干问题与成矿预测. 见: 地质力学文集(9). 北京: 地质出版社, 1989. 47~58
- 60 吕古贤. 北京延庆石槽铜矿矿田构造研究. 中国地质科学院年报. 北京: 地质出版社, 1982. 192~194, 471~473
- 61 吕古贤. 石槽矿区不同力学性质结构面中岩浆岩的某些变异问题探讨. 中国地质科学院院报, 1987, (17): 65~80
- 62 吕古贤. 关于构造附加静水压力研究. 科学通报, 1995, 40(3): 286
- 63 吕古贤, 孔庆存. 胶东玲珑-焦家式金矿地质. 北京: 科学出版社, 1993. 253
- 64 吕古贤, 刘瑞珣. 重力和构造力在地壳中的应用. 高校地质学报, 1996, 2(1): 29~37
- 65 克列梅涅茨基 A A, 等. 金矿系统演化的普遍性是其工业矿床区域预测的关键准则. 国外地质科技, 1996, 6: 1~8
- 66 Samama J C. La logique des giselements metalliferes. *Bull Soc Geol France*, 1985, 8(7): 1~15
- 67 李晓波. 成矿作用与地球动力学. 见: 肖庆辉编. 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 49~54

68 吕古贤,王红才,彭维震,等. 不同构造带变形能的模拟研究. 科学通报, 1998, 43(5): 467~470

69 邱小平, 吕古贤, 武红岭, 等. 构造摩擦热的初步研究. 地球学报, 1998, 19(2): 132~137

70 Jr Wilkins J. Mineralization related to detachmont faults: A model. Arizona Geological Society Digest, 1986, 10(1): 108~117

71 吕古贤. 胶东半岛构造-岩相形成及玲珑-焦家式金矿的构造动力成岩成矿地质特征研究. 中国地质科学院院报, 1991, (23): 65~80

72 吕古贤, 王红才, 郭涛, 等. 热源体分割程度引起热传导及其温度变化. 科学通报, 1999, 44(10): 1099~1102

73 科兹洛夫斯基 E A, 著. 科拉超深钻井(上). 张秋生主译. 北京: 地质出版社, 1991. 1~218

74 罗元华, 孙雄. 不同应力状态下地层渗透系数的变化及其对流体运移影响的数值模拟研究. 地球学报, 1998, 19(2): 144~150

75 孙雄, 洪汉净, 马宗晋. 构造应力作用下流体运动的动力学分析——构造流体动力学. 地球学报, 1998, 19(2): 150~157

76 王子潮. 石榴石的高温塑性: 地幔转换带的流变特性. 地球物理学进展, 1994, 9(2): 17~32

77 金振民, 章军锋, Green II H W, 等. 大洋深俯冲带流变性质及其地球动力学意义——来自地幔岩高温高压实验的启示. 中国科学, D 辑, 2001, 31(2): 969~976

78 陈晶, 王清晨, 翟明国, 等. 榴辉岩中石榴石的塑性变形特征. 中国科学, B 辑, 1995, 25(10): 1116~1120

79 林传勇, 史兰斌, 何永年. 华北地区上地幔流变学特征初探. 见: 中国上地幔特征与动力学论文集. 北京: 地震出版社, 1990. 90~101

80 Griggs D T, Bou J F. Experiments beaving on the orientation of quartz in deformed rocks. Bull Geol Soc America, 1938, 49: 1723~1746

81 Handing J. Strength and ductility. In: Clark S P, eds. Handbook of Physical Constants. The Geological Society of America, INC, 1966. 251

82 王清晨, 刘景波, 从柏林. 构造超压能引起超高压变质作用吗? 科学通报, 1999, 44(21): 2346~2350

83 王方正. 高压、超高压变质岩形成深度探讨. 地球科学, 1996, 21(1): 41~44

84 Bridgman P W. Effects of high shearing stress combined with high hydrostatic pressure. Phys Rev, 1935, 48: 825~847

85 Ernest G E. The Interpretation of Geological Phase Diagrams, San Francisco: W H Freeman and Company, 1972. 1~120

86 吕古贤, 林文蔚, 李晓波, 等. 构造物理化学与金矿成矿预测, 北京: 地质出版社, 1999. 300

87 翟裕生, 吕古贤. 构造动力体制转换与成矿作用. 地球学报, 2002, 23(2): 97~102

88 林文蔚, 殷秀兰. 成矿流体的浓缩作用及浓缩方式研究. 地球学报, 1998, 19(2): 158~166

89 吕古贤, 郭涛, 舒斌, 等. 构造变形岩相形迹的大比例尺填图精确对隐伏矿床地质预测. 中国区域地质, 2001, 20(3): 313~321

90 吕古贤. 构造岩浆活化区金矿矿源岩系的矿化趋势度概念与研究性填图方法. 地球学报, 2002, 23(2): 107~114

91 王子潮, 马宗晋. 俯冲带深部物质的非均匀流变及其地球动力学意义. 中国科学, D 辑, 1996, 26(2): 179~186

92 潘立宙. 变形椭球的性质及其在地质应用中的一些问题. 力学, 1976, (1): 6~17

93 吕古贤. 自然科学基本概念的进步和学科的发展——地质力学三重基本概念的探讨. 自然辩证法研究, 1991, 7(7): 36~44

94 李思田. 沉积盆地的动力学分析——盆地研究领域的主要趋向. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 1~7

95 白玉宝. 长庆地区延长组储层富集区块的地质规律研究. 地质论评, 1996, 42: 242~246

96 殷秀兰, 李思田. 莺歌海盆地超压体系的成因及与油气的关系. 地质力学学报, 2000, 6(3): 69~77

97 胡宝群, 王方正, 肖龙. 超高压变质作用压力模型的思考. 地质力学学报, 2000, 6(3): 63~68

98 吕古贤. 山东玲珑金矿田和焦家金矿田成矿深度的测算与研究方法. 中国科学, D 辑, 1997, 27(4), 337~342

99 裘有守, 王孔海, 杨广华, 等. 山东招远-掖县地区金矿区域成矿条件. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1988. 1~291

100 Okay A L, Xu S, Sengor A M C. Coesite from the Dabieshan eclogite, Central China. European J Mineral, 1989, 1: 595~598

101 Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in Central China. Geology, 1989, 17: 1085~1088

102 吕古贤, 陈晶, 李晓波, 等. 大别超高压变质带含柯石英榴辉岩形成深度的构造校正研究与测算. 科学通报, 1998, 43(24): 2590~2602

103 Hirth G, Tullis J. The brittle-plastic transition in experimentally deformed quart aggregates. J of Geophysical Research, 1994, 99(B6): 11731~11747

104 丁悌平. 大别山超高压变质岩形成深度同位素限制. 地质力学学报, 2000, 6(3): 39~44

105 匡少平, 凌文黎, 张本仁. 大别造山带中镁铁质-超镁铁质岩石和榴辉岩有关问题的讨论. 地质论评, 1999, 45(16): 584~595

(2002-07-04 收稿, 2002-08-21 收修改稿)

www.scichina.com

109