

区域变质作用中的流体

游振东, 钟增球, 周汉文

(中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:区域变质条件下流体的流动有4种标志:(1) 细脉;(2) 岩石学;(3) 稳定同位素;(4) 常量元素的交代作用。不同级别的区域变质作用中,流体影响着岩石的变质反应和变形;在高级变质的情况下甚至有熔体出现。在超高压变质条件下,流体量比地壳范围区域变质要少得多,从大别山超高压变质带的资料可知,流体的演化有明显的阶段性,局部曾发现熔融包裹体。水流体的介入,引起岩石的退变质和元素地球化学变异,是超高压变质岩抬升、进入中下地壳的产物。新近的实验岩石学成果说明,多硅白云母、角闪石等含羟基的矿物,在俯冲达100 km以下依然稳定,而一些花岗岩体系在超高压的条件下产生的超临界流体,乃是花岗岩、片麻岩只能部分保留超高压矿物组合的原因。

关键词:变质作用;流体;超高压变质;超临界流体

中图分类号:P51;P588.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2001)03-0157-08

在区域变质作用中,流体的作用表现在如下几个方面:(1) 流体压力影响着脱水和熔融反应的温度;(2) 在 $H_2O - CO_2$ 混合的情况下,流体的成分影响着脱气作用的温度;(3) 流体控制着脉体矿物的堆积并能影响岩石中常量、微量和同位素的含量;(4) 流体能改变岩石的氧化还原状态;(5) 流体能在地壳中传输热量,而且岩石的流变性直接受控于流体压力,所以变形与流体压力是紧密相关的。多年来变质流体一直是地质界关注的焦点。人们早就知道变质作用的过程中水会从岩石中逃逸出去,最简单的例子如夕线石钾长石片麻岩含 H_2O (质量分数) 低于1%,而它的原岩,泥岩含 H_2O (质量分数) 可高于10%。但是,对于流体在变质作用中的行为却莫衷一是。本文的目的在于评介变质作用中流体岩石相互作用的各种方式,并试图运用这些观点来考察变质带,包括超高压变质带的演化。

1 变质作用中流体的流动

Spear(1993)和 Doug Rumble(1989)^[1,2]曾经总结过区域变质作用中流体流动的主要证据,它们是

收稿日期:2001-07-30

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(1999-0755-06)

作者简介:游振东(1928—),男,教授,博士生导师,岩石学专业。

矿物细脉、变质反应的进行、稳定同位素和常量元素的交代作用。

1.1 流体流动的矿物细脉证据

在变质岩区石英脉到处可见,它们是流体在地壳中流动的正面证据。矿物细脉说明岩石中的裂隙具渗透性,通过细脉传输的流体量是巨大的。估算流经细脉流体数量的一个办法就是质量平衡计算。 SiO_2 在水流体中的溶解度已有实验资料,是可知的。所以,对于一给定体积的石英在脉中沉积所需要的流体量是可以计算的。图1是一个 $p-T$ 图解,从图中看出:在500、0.5 GPa的条件下,一个与石英处于平衡的流体,大约有 $10^{-0.85} = 0.14$ mol/L 的 SiO_2 ,即每L H_2O 沉积 3 cm³ 的 SiO_2 。假使全部 SiO_2 以石英的形式在流体中沉淀,则每 cm³ 的石英需要 333 mL 的溶液。不过这个数值必然是最小估计值,因为这里假设的是能够沉积的 SiO_2 的上限。据图1可知, SiO_2 在水溶液中的浓度随 p 、 T 的增高而增加。因此,流体沿裂隙上升接近地表时有利于石英的沉淀。如果温度、压力梯度和在这些梯度下的石英溶解度的变化为已知,则一个脉中经流体而沉淀出的石英的体积便可以计算。据估算,为要获得 1 cm 厚的石英脉,就得需要 0.33×10^9 cm³ = 0.33×10^6 L 的 H_2O 。由此可见,在变质作用的过程中是需要大量水的^[1]。

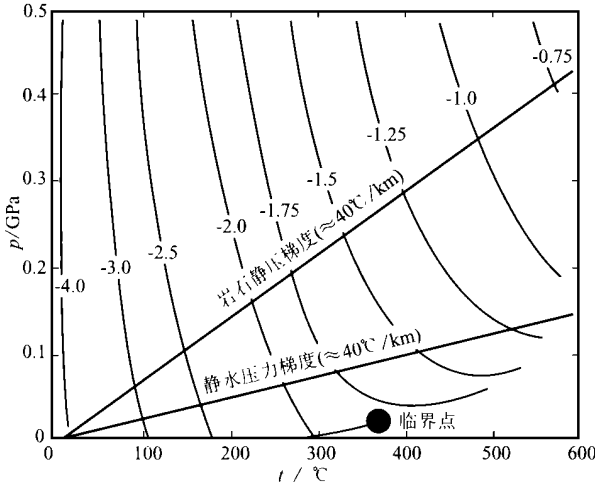


图1 $p-T$ 图解,等值线表示 SiO_2 水溶液与石英平衡时的浓度 (g/kg)
(据 Walther 和 Helgeson, 1977)^[3]

Fig. 1 $p-T$ diagram showing isopleths of dissolved aqueous silica concentration in equilibrium with quartz
对于典型的地温梯度, SiO_2 的溶解度随深度而增加

1.2 流体流动的岩石学证据

在变质的沉积岩和火成岩中均可觉察流体流动的证迹。岩石学的优点在于它能获得颗粒边界的或粒间的渗透率。而流体流动的量可以根据变质反应的进行加以测定。要区分两类流动:(1) H_2O 和 CO_2 等挥发份是由相互接触的矿物颗粒局部反应时从反应位析出的,反应位上的流体/岩石比值一般均远低于 1.0^[4]。(2) 外部来源的流体渗透于岩石之中。如果渗入的流体与寄主岩(围岩)不平衡,就会有矿物被溶解或沉积,固体溶液的矿物就会改变其自身的成分。所产出的挥发份将被稀释或者疏导^[5]。一般区域变质中,流体/岩石的(体积)比值在 1:1 至 4:1 者不少见。在低压巴肯(Buchan)型变质带中,其流体/岩石比估计高达 17:1^[6]。

1.3 流体流动的稳定同位素证据

用稳定同位素地球化学方法估算流体/岩石的体积比,已被证明对于区域变质岩是有效的。现在的问题是变质矿物的稳定同位素分析结果在何种程度上能解决 Ferry 的渗入驱动说。Doug Rumble (1989)^[2]认为有 3 种学说可以解释脱气反应:(1) 大孔洞;(2) 裂隙平衡;(3) 渗入驱动反应(infiltration driven reaction)。只要反应的计量数、流体的特性、温压条件、矿物和流体之间的同位素分馏标度等为已知,就可以计算上述 3 个方案的岩石同位素的演化。

所谓大孔洞,是指挥发性生成物停留在反应位一段时间。裂隙平衡则指的是挥发份一旦析出,立即离开反应位,永不再回来。计算表明具有大孔洞或裂隙平衡的岩石 ^{18}O 的值约在 2‰~4‰。脱气反应中 ^{18}O 的变化很小,因为经过变质以后,原岩中所含的氧仍保留锁定在矿物的反应位上。然而对于渗入驱动的反应,则显示有大的 ^{18}O 的变化。其大小受渗入流体与寄主岩之间的同位素达到相互平衡的程度所控制。稳定同位素分析可以检验 Ferry 的模型。岩石中测得的 ^{18}O 大于用大孔洞和裂隙平衡模型所预计的值时,就有理由认为属于渗入驱动的脱气反应。从逻辑意义上说,同位素的检查是必要的但并非是充足的。如果渗入的流体已经与岩石达到同位素平衡,则无从留下证据。

在封闭体系或所谓单纯的 Rayleigh 蒸馏作用中,形成的变斑晶、同位素的变化必然很小。如果像石榴石这样的变斑晶同位素环带显示出与封闭体系、蒸馏模型不相一致的样式,那就可能存在渗入作用而影响变斑晶的生长。

Kohn(1993)^[7]曾经详细研究智利南端 Tierra del Fuego 的变质泥质片岩中的石榴石、十字石变斑晶中的同位素成分环带,发现石榴石的核部 ^{18}O 值为 +3.5‰,而边部大达 +4.29‰,这是因为石榴石的结晶作用引起流体中氧同位素的蒸馏,使剩余的岩石氧同位素加重所致。不过,它仍属于封闭体系的范畴。

1.4 流体流动的常量元素交代作用证据

流体的渗入伴随物质的迁移,这就可能影响岩石的化学总成分。常量元素在变质流体中的溶解度甚微,所以要引起常量元素作显著的变动,必然要求有大量的流体参与。Ague (1991)^[8]根据变质泥质岩的常量元素分析,认为变质会影响常量元素的化学行为。Ti 和 Al 显然因变质级的增加而提高。这些元素比起其它常量元素(例如 SiO_2 , K_2O , Na_2O 和 CaO)的溶解度要低得多,所以它们的富集,是由于易溶元素移出导致残留相对富集。Ague 估算,变质泥质岩经质量迁移要丢失原始质量和体积的 30%,其中最主要是丢失 SiO_2 。

从上述诸方面可看出流体流动是岩石变质作用的重要影响因素之一。在地壳构造发展的过程中,变质岩占有重要地位,因为它出现在构造活动最为显著的大陆造山带之内,保存着大量的构造作用的印记。它不仅影响着变质矿物组合的更替,同时也

影响着岩石的变形。流体在这方面起着重要作用。

2 不同变质级的流体与变质变形

不同变质级的变质和变形中均有流体作用,但其表现各不相同。现以泥质和长英质岩石为例加以比较^[9]。

2.1 低级变质 (< 400)

低级变质的长英质和泥质岩以富含各类叶片状硅酸盐矿物为特征。含有白云母 + 绿泥石 + / - 黑云母的矿物组合多半是从泥岩变质而成。多次复合的前进变质反应可以对变质流体含量作出贡献,引起许多矿物连续地溶解/再沉积。矿物颗粒的反复更新大多发生于细粒岩石中,并不影响到粗粒部分的原生沉积构造。

低级变质中随处可见同变质伸展性脉体,说明流体压力至少是周期性地大于岩压 ($p_f > p_l$),这岩压即相当于最小的主压应力轴₃,低级变质中受裂隙控制的纤状矿物细脉和压力影等,都记录了递增应变的历史,说明变形/变质过程中 $p_f > p_l$ 。不过低级变质的相平衡一般认为是 $p_f = p_l$ 。

低级变质岩中的流体包裹体,一般是含水的,盐度极低。虽然局部地区甲烷和二氧化碳是重要成分。低的盐度与沉积盆地的卤水极不相同。因此,水不大可能来自沉积物本身,而应来自变质反应,变质水可能是变质流体的主要成分。

2.2 中级变质 (400 ~ 650)

连续的变质作用使中级变质仍有流体逐步释放。不过矿物重复的成核、生长和溶解的迹象比低级变质更为显著。变质相平衡中,流体压力近等于岩压, $p_f = p_l$ 。并且具有较大的时间累计流体/岩石体积比,其证据如下:(1)各种进变质反应的质量平衡计算结果;(2)稳定同位素的交换程度;(3)广泛出现的区域性的面理,特别是折劈理。

变质流体一般多具有低的盐度,不过有些流体包裹体的数据说明 CO_2 是其重要的组分。 CO_2 的来源就是石墨或含碳酸盐的组合,或者它代表幔源流体的比例在增加。

2.3 高级变质 (> 650)

虽然在高角闪岩相的变质地区水的活度 ($a_{\text{H}_2\text{O}}$) 仍然较高。麻粒岩的相平衡所确定的 $a_{\text{H}_2\text{O}} < 1$ 并可以认为 $p_f < p_l$, 不过这种低的水活度,纯粹是因为 H_2O 受到其他组分(例如 CO_2 , CH_4) 的稀释所致,而

不是因为流体压力太低。当区域变质的温度大于 650 时,长英质和泥质的岩石就要发生部分熔融。所涉及的重熔反应可以是有蒸气或者无蒸气的。有蒸气的反应得益于难熔于硅酸盐熔体的组分,如 CO_2 的促进,而得以进行,但是大部分的“ H_2O ”则溶于熔体中。如同结晶质的含水矿物组合于无蒸气条件下的熔融一样。所以,当不再有继续供给挥发份的来源(如地幔或幔源岩浆)时,高温的前进变质流体,多半是由含有或不含气相的硅酸盐熔体所组成。

高级变质通过硅酸盐熔体的作用产生质量迁移,在宏观和区域规模都很容易观察到。原地型和注入式的混合岩涉及的是 1 m 或以上规模的物质迁移。可用麻粒岩相条件下的壳源花岗岩类说明高级变质地区大规模的熔体平流 (advection) 的重要性。

高级变质岩的结构,与中级变质的一样,也是以低能态颗粒形状为特征。组构的各向异性趋向于降低。在角闪岩相岩石中,石英 c 轴的优选方位是较弱的,可是有些麻粒岩,却有所增强。这实际上是原生的粗粒集合体经过变形产生了一系列的透镜状集合体,因而具有强的 c 轴组构。它们实际上不是严格意义上的麻粒岩,最好描述为高级变晶糜棱岩。

2.4 关于退变质作用

大多数进变质岩石,在后期冷却、抬升和退变质的过程中,都能保持峰期的变质矿物组合和结构。这些退变质带往往就是变形带或热液活动带。剪切带(糜棱岩带)就是变形增强了退变质反应的位置。退变质通常要有再水化反应,要求 H_2O 的引入。但所需的体积相对较小,可是许多剪切带的研究证明,退变质过程中有大量流体流入。Fyfe (1972)^[10] 采用特殊的氧化还原反应计算 Laxfordian 剪切带流体体积,得出其流体/岩石的体积比竟高达 10^3 。Beach (1976) 对该带进行了离子交换反应的计算,获得流体/岩石体积比至少为 10^2 。Etheridge 和 Copper (1981)^[11] 计算了 Broken Hill 剪切带,如体积丢失在 10% ~ 20% 至少也有 10 m 的规模,这只能通过退变质大容量流体的流入才有可能,要求流体/岩石的比达 10^3 甚至 10^4 。

从以上所述可以了解:无论进变质退变质,流体相的存在都是非常重要的。活动的、以水为主的高压流体是变质作用的天然产物,而且有证据说明,某些变质环境存在大的流体/岩石体积比。这些流体可以赋存在颗粒的间隙、裂隙中,通过不同的驱动力

而渗透、流动。其中不能不提到热的对流,它影响着流动途径和渗透率的变化。

3 超高压变质带中流体的作用

传统的观点认为榴辉岩相的变质都是“干”的。超高压变质岩中流体包裹体的研究,特别是近来一些超高压变质矿物的实验研究成果深刻改变着这一看法。

3.1 大别超高压变质带的流体包裹体

韩郁菁和张泽明(1996)^[12]以大别山的英山、石马、碧溪岭双河和新县等地的榴辉岩、硬玉石英岩进行流体包裹体研究,发现这些高压、超高压变质岩中包裹体数量虽少,但类型比较丰富,不但发现了气液包裹体,更重要的是首次发现了熔融包裹体。

3.1.1 气液包裹体的成分类型

(1) 单相水溶液包裹体(L_{H₂O})。在各类岩石中均可见到,随机或成群出现,有的沿显微裂隙分布。包裹体的形态呈椭圆形或不规则状,占包裹体总量约20%。包裹体直径<15 μm,少数可达35 μm。

(2) 单相气体包裹体(V_{CO₂})。双河硬玉石英岩和碧溪岭榴辉岩中可见此种包裹体,占包裹体总量的10%。不过,在双河的硬玉石英岩单相气体包裹体中,激光拉曼探针分析发现有液相L_{CO₂},出现在硬玉晶内包裹物的石英中,属于较早期捕获的包裹体。

(3) 气液两相富H₂O包体(L_{H₂O}+V_{H₂O})。可分为富气和富液两种类型。前者见于英山榴辉岩中,量少呈小群体产出,占包裹体总量的5%;后者为区内最常见的包裹体,成群、成带或沿裂隙分布,量多,占55%~85%。

(4) 气液两相富CO₂包裹体(L_{CO₂}+V_{CO₂})。常见于超高压岩石单元,如石马柯石英榴辉岩和双河硬玉石英岩中。量少(<15%),呈孤立或小群体产出。

(5) 三相富CO₂包裹体(L_{H₂O}+L_{CO₂}+V_{CO₂})。包裹体中CO₂的含量较高,其质量分数可达40%~80%,包裹体呈椭圆、圆形、负晶形或不规则状,多孤立产出,见于英山、石马等地,在石马的柯石英榴辉岩中,它出现在石榴石的晶内石英中。推测应属于超高压变质早期的包裹体。

(6) 含子矿物的多相包裹体(L_{H₂O}+V_{CO₂}+S_{NaCl})除了气相、液相之外,包裹体中还有盐类子矿物,成分比为 x(L_{H₂O}):x(V_{CO₂}):x(S_{NaCl})=6 2 2,

出现于双河和熊店榴辉岩以及新县的榴闪岩中,孤立或成群分布。包裹体的直径7~45 μm,形态以负晶形为主,少见椭圆形或不规则状。

肖益林在碧溪岭榴辉岩中发现5种类型流体包裹体,并指出超高压峰期变质流体以NaCl为主(Xiao, 2000)^[13]。

3.1.2 熔融包裹体

熔融包裹体主要的物相为玻璃态,在大别超高压变质带中属较为少见的包裹体。碧溪岭、石马、熊店等地的各类榴辉岩中均有发现,多呈孤立产出。包裹体直径8~25 μm不等。形态负晶形、浑圆形或不规则形。寄主矿物有绿辉石、石榴石、蓝晶石和

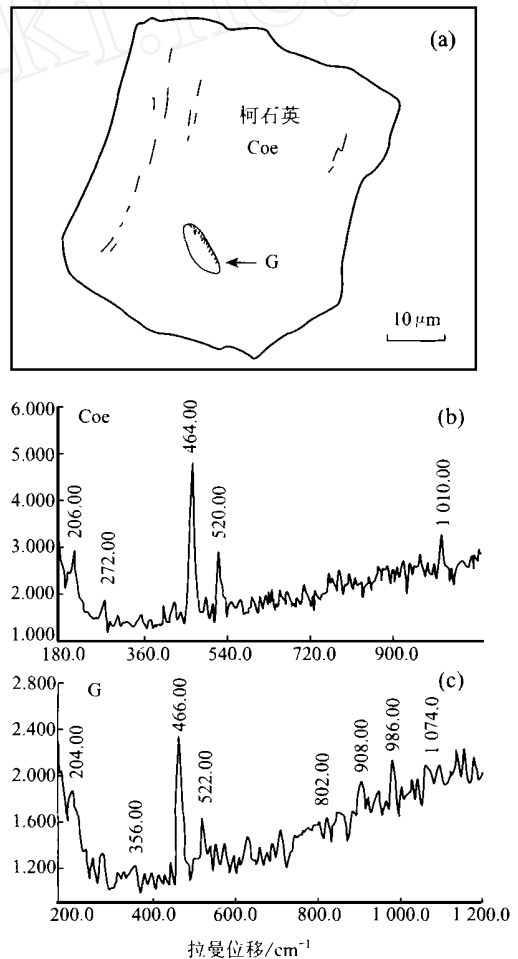


图2 (a)柯石英(Coe)中的熔融包裹体(G)(长15 μm); (b)柯石英的激光拉曼谱; (c)柯石英内熔融包裹体的激光拉曼谱

Fig. 2 (a) The melt inclusion (G) in coesite (Coe) (L = 15 μm); (b) Raman spectrum of the coesite (Coe) host; (c) Raman spectrum of the glass phase inclusion (G) in coesite

柯石英。熔融包裹体有玻璃质熔融包裹体和流体熔融包裹体两种类型。前者见于后成合晶不发育的、

原生的超高压榴辉岩中;后者除了玻相之外,玻璃质与气相之间尚有液相,见于高压榴辉岩和后成合晶发育的榴辉岩中。

熔融包裹体中玻相分子网络结构的研究发现,玻相包裹体与寄主矿物之间存在近似的关系。在蓝晶石中的玻相,其拉曼谱与其寄主矿物蓝晶石相近;柯石英中的玻相,其拉曼谱型与寄主矿物柯石英近似(图2)。熔融包裹体的出现有两种可能:(1)寄主矿物是由该成分的熔体晶出的;(2)退变质过程中的选择性熔融结果。

3.1.3 包裹体的成因

超高压变质岩中早期流体包裹体的数量比一般变质岩要少得多。但是当超高压变质岩抬升折返进入中下地壳之后,流体大量地渗入,主要引起广泛的退变质作用,在晚期则有阳起石、碳酸盐、石英等细脉的穿切。另外现今所找到的气液包裹体其均一温度均在500℃以下,这也说明了后期退变质流体的广泛存在。

卤素 I、Br 和 I 是流体来源的有效示踪剂。与全球相比,海水中的 I 是亏损的,这是海洋中有机物吸收的结果。高级变质的流体,相对于 Cl、Br 而言,I

是富集的。大别山区的超高压榴辉岩,硬玉石英岩,其流体的 $x(\text{Br})/x(\text{Cl})$ 、 $x(\text{I})/x(\text{Cl})$ 比值均远高于海水和全球平均值。因此可以认为他们应是深源的变质流体。

3.2 榴辉岩的退变质过程中的元素地球化学

从榴辉岩—退变质榴辉岩—斜长角闪岩是榴辉岩从高压变质到折返减压的过程的反映。周汉文(1997)^[14]系统研究了太湖花凉亭的一个榴辉岩体,取退变不同的3个样品,以保证元素地球化学对比的同一性。对比发现:(1)退变质中氧逸度明显增高,从榴辉岩的 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO}) = 0.25$ 变到斜长角闪岩 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO}) = 0.49$,说明榴辉岩从岩石圈地幔折返至中下地壳时氧逸度增高。(2)地壳流体明显参与了榴辉岩的退变质过程,从榴辉岩到斜长角闪岩,地壳元素 U, Th, Pb, LREE 等明显富集(图3), $w(\text{Th})/w(\text{Nb})$, $w(\text{Th})/w(\text{U})$, $w(\text{Th})/w(\text{Yb})$, $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 的比值也显著提高。(3)退变质过程中 Cs, Rb, Sr, Ba 等大离子亲石元素非常活泼,其含量从榴辉岩到斜长角闪岩呈现出先增高后降低的变化趋势。 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$, $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$, $w(\text{Ba})/w(\text{La})$ 等比值也有类似的变化。他们

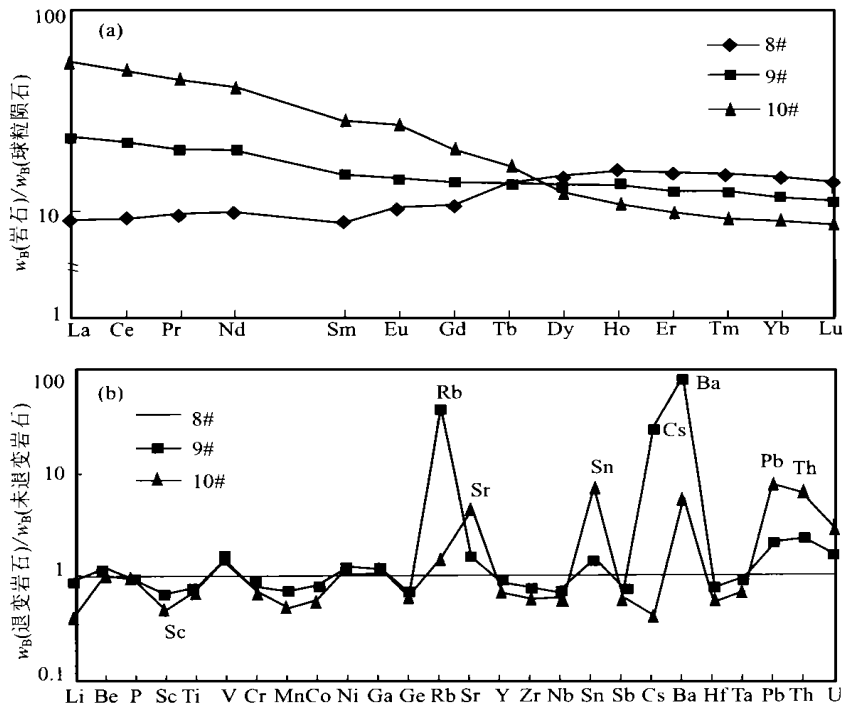


图3 (a) 花凉亭榴辉岩(8#)及其不同退变质产物(9#,10#)稀土元素球粒陨石标准化图谱;

(b) 退变榴辉岩(9#)和斜长角闪岩(10#)微量元素的榴辉岩(8#)标准化图谱

Fig.3 (a) The chondrite-normalized diagram of REE from eclogite(8#) to various retrograded rocks;

(b) Eclogite-normalized diagram for retrogressive eclogite(9#) and amphibolite(10#)

在早期退变质时从地壳加入于榴辉岩,随退变质作用的进一步发展又从斜长角闪岩中带出。凡此均说明,在退变质过程中,地壳流体制约着岩石的元素地球化学变异。

3.3 超高压变质岩中的稳定同位素

1990年代中期以来郑永飞和美国的 Doug Rumble^[15]等对大别—苏鲁的超高压变质岩中的 O、H 和 C 等稳定同位素的系统研究发现,尽管超高压变质岩受到过强烈的变质变形,它的原岩同位素特征却能很好地保存。例如大别山双河等地的大理岩 ¹³C 值为 +5‰~+6‰,代表变质前的沉积成岩作用。令人深思的是发现了极低的 ¹⁸O 和 D,在榴辉岩的石榴石中为 -10‰,在多硅白云母则为 -120‰。它们记录了俯冲期前的古地热的历史,具有热大气降水影响的蚀变地表岩石,出现在相当于南沱冰碛期的寒冷气候条件下。原岩同位素值,尤其是整个地球动力学系统的同位素成分差的保存,说明了超高压变质过程中并不存在自由环流的流体相。同时,也说明这一前碰撞的古地温系统,在俯冲及折返的过程中并未被消除,所以榴辉岩和相邻的片麻岩同样均受到超高压变质。

4 实验岩石学的成果对超高压流体的启示

4.1 6.5~11 GPa 下的多硅白云母

Domanik 和 Holloway (2000)^[16]用大别山超高压变质的钙质变质泥质岩作起始材料,它含 2.1% (质量分数)的 H₂O, 6.3% 的 CO₂, 在多项设备条件下实验,压力为 6.5~11 GPa,温度为 750~1050℃。多硅白云母在 6.5~9 GPa、900℃ 时,与榴辉岩相的矿物组合石榴石、绿辉石、柯石英、金红石和流体共存;在 8~11 GPa、750~900℃ 之间,多硅白云母脱水产生钾-锰钡矿同时,有菱镁矿、羟黄玉与之共生。石榴石变得富含钙(平均 $x_{\text{GrS}} = 0.52$, $x_{\text{Py}} = 0.19$),绿辉石变得富含硬玉($x_{\text{Jd}} = 0.92$)。质量平衡计算表明,流体相中挥发份含量的显著变化是在多硅白云母/钾锰钡矿转变的界限上。 $p = 8$ GPa 时,与多硅白云母共存的流体显得相对富 CO₂ ($x_{\text{CO}_2}/x_{\text{H}_2\text{O}} = 2.2$);而当压力为 11 GPa 时,与钾锰钡矿共存的流体是富水的($x_{\text{CO}_2}/x_{\text{H}_2\text{O}} = 0.2$)。白云母中的多硅白云母含量随压力的增加而增高:6.5 GPa 时为 3.62 Si 每化学式单位 (pfu), 9 GPa 时为

3.80 Si (pfu)。这一实验说明:在俯冲带上,假定水的活度 $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$,多硅白云母的稳定深度可达 300 km。其他的高压含水相如硬柱石、镁铝-绿纤石和羟黄玉,也会存在于俯冲带内,但要求有更富 H₂O 的流体。而且,多硅白云母参与了混合挥发份的反应从而显著改变着深俯冲带下 300 km 沉积物析出的流体的性质和交代作用。

4.2 超高压镁铁质超镁铁质体系中 H₂O 的循环

实验岩石学证明,以水流体为媒介的矿物的溶解和再沉积要比固体-固体之间的转化快若干个数量级,所以一个独立的水流体会显著提高反应速率。完全缺失水流体会阻碍矿物的转化。那末,挥发组分从哪里来呢? Ernst (2000)^[17]认为,对于一个典型的俯冲的 $p-T$ 轨迹而言,大多数深位变质的玄武岩成分的岩石,角闪石乃是最主要的含(OH)矿物;其他含水矿物只有次要的丰度。压力在 2.0~2.4 GPa 时,单斜角闪石脱水,不过压力越级会让脱挥发份的作用稍为停滞。所以镁铁质的蓝片岩和冻蓝闪石质的角闪岩在 ~100 km,即岛弧岩浆发生的深度,排出水来,并通常达到稳定榴辉岩相的组合。位于洋壳之下的蛇纹石化地幔也是在类似条件下脱挥发份。只有变质辉长岩类事实上是完全干的,且颗粒较粗,所以低压的矿物组合能够准稳定地保存下来。对于实际的俯冲带的地温梯度,压力超过 3.5 GPa 时,白云母 ± 黑云母在硅铝壳中仍保持稳定。由此可见,当俯冲到很大的深度时,构成陆壳的富含云母长英质片岩和片麻岩不可能释放出大量的 H₂O,不完全地转变为稳定的榴辉岩相的组合。深俯冲的部分水化的大洋岩石圈提供大量的挥发份,结果是大量深俯冲的云母质硅铝物质部分熔融,沿俯冲带或在其上产生钙碱性岩套,最后挥发份消失。

4.3 花岗岩体系实验的新进展

Schreyer (2000)^[18]在一篇总结性的论文中指出,近年来花岗岩体系实验岩石学研究的一大进展就是原位地测定温压图解中的临界曲线。含水的熔体和含硅酸盐的蒸气在低压下共存;在高压下,成分上相互融合变为一个单相的超临界的流体。它们在 $p-T$ 图中,从 ~1.5 GPa、近 1000℃ 可延伸到 ~2.5 GPa、近 700℃。原先测定的水过剩花岗岩在高压下的熔融,是用淬火法标定的,它不能保证所检测的最终产物。特别是流体相,能无误地代表实验条件。

在超高压变质有水存在的条件下,花岗岩并不发生熔融,而是或多或少地、逐渐地随着温度的升高溶解于超临界流体中,而没有明确的“熔点温度”。超临界流体中的无水组分从低温下的、主要为钾质强不混熔的硅酸盐,经过超钾质的石榴岩质成分,一直变到接近于完全溶解温度的混熔的花岗岩。超高压变质作用中,如有含水超临界流体存在,在所有的温度下,只要有足够的水,深俯冲陆壳的流变学性质会有决定性的弱化效应。

超高压变质带中的超临界流体,可以晶出微粒金刚石。据 Stockhert (2001)^[19]报道,在德国 Saxonian Erzgebirg 发育的片麻岩榴辉岩单元中,超高压片麻岩透镜体中的石榴石包裹有多相细粒集合体,其中微粒的金刚石与金云母、石英、钠云母、多硅白云母、磷灰石及金红石等共生。此类包裹体代表原先存在的一种高密度的超临界 COH 流体,富含 K、Na 和 Si。金刚石是以一种子晶在超高压条件下冷却沉积的。由于围压的释放,在主晶石榴石中留下的脆性破裂显示为放射状裂隙。包裹体中的硅酸盐组合,是进一步冷却时晶出的。其内压已降低到金刚石稳定区之外。所以出现了石英、钠云母和斜长石。包裹体内的云母类矿物组合是流体与石榴石之间反应的产物,先期形成的金刚石子晶是准稳定地保存下来的。这种含有金刚石的包裹体为陆壳俯冲带超高压变质过程中超临界 COH 流体的存在提供了无可辩驳的证据。

目前,大别—苏鲁地区超高压变质的研究正不断深入,在片麻岩中已发现一些超高压的证据^[20,21]。下一步应该留意这种与超临界流体有关的超高压矿物信息。最近刘景波在大别超高压变质带片麻岩的锆石中,除柯石英外,还发现了重晶石、硬石膏、文石、方解石等矿物包裹体。说明超高压变质阶段有含硫酸根、碳酸根的变质流体的参与(Liu, 2001)^[22]。这些新发现必将把超高压变质流体的研究引向深入。

参考文献:

- [1] SPEAR F S. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths* [M]. Washington D C: Mineralogical Society of America, 1993, 19: 673-708.
- [2] DOUGLAS R . Evidences of fluid flow during regional metamorphism[J]. *Eur J Mineral*, 1989, 1: 731-737.
- [3] WAL THER J V, HEL GESON H C. Calculation of the thermodynamic properties of aqueous silica and solubility of quartz and its polymorphs at high pressures and temperatures[J]. *Am J Sci*, 1977, 277: 1315-1351.
- [4] WAL THER J V, ORVILLE P M. Volatile production and transport in regional metamorphism [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1982, 79: 252-257.
- [5] FERRY J M. Reaction progress: a monitor of fluid rock interaction during metamorphic and hydrothermal events [A]. WAL THER J V, WOOD B J. *Fluid-Rock Interactions During Metamorphism* [M]. New York: Springer Verlag, 1986. 60-88.
- [6] HOISCH T D. Heat transport by fluids during late Cretaceous regional metamorphism in the Big Maria Mountains, Southeastern California[J]. *Geol Soc Am Bull*, 1987, 98: 549-553.
- [7] KOHN M J, VALLEY J W, ELSENHAIMER D, et al. Oxygen isotope zoning in garnet and staurolite: evidence for closed system mineral growth during regional metamorphism[J]. *Am Mineral*, 1993, 72: 988-1001.
- [8] AGUE J J. evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites[J]. *Geology*, 1991, 19: 855-858.
- [9] ETHERIDGE M A, WALL V J, VERNON R H. The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation [J]. *J Metamorphic Geol*, 1983, 1: 205-226.
- [10] BEACH A, FYFE W S. Fluid transport and shear zones at Scourie, Sutherland: evidence of overthrusting [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1972, 36: 175-180.
- [11] ETHERIDGE M A, COOPER J C. Rb/ Sr isotopic and geochemical evolution of a recrystallized shear (mylonite) zone at Broken Hill[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1981, 78: 74-84.
- [12] 韩郁菁, 张泽明. 高压超高压变质作用中的流体[J]. *地学前缘*, 1996, 3(4): 224.
- [13] XIAO Yilin, HOEFS J, KERKHOF A M, et al. Fluid history of UHP metamorphism in Dabieshan, China: a fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 139: 1-16.
- [14] 周汉文, 李献华, 刘颖. 南大别花凉亭榴辉岩退变质作用过程的元素地球化学变异[J]. *地球化学*, 1997, 26(5): 25-33.
- [15] DOUGLAS RUMBLE, WANG Q, ZHANG R. Stable isotope geochemistry of marbles from the coesite UHP terrains of Dabieshan and Sulu, China[J]. *Lithos*, 2000, 52: 79-95.
- [16] DOMANIK K J, HOLLOWAY J R. Experimental synthesis and phase relation of phengite muscovite from 6.5 ~ 11 GPa in a calcareous metapelite from the Dabie Mountains, China[J]. *Lithos*, 2000, 52: 51-77.
- [17] ERNST W G. H₂O and ultrahigh-pressure subsolidus phase relation for mafic and ultramafic systems[A]. ERNST W G, LIOU J G. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-Type Orogenic Belts: Final Report of the Task Group -6 of the International Lithosphere Project* [C]. GSA: Bellwether publishing Ltd, 2000. 121-129.
- [18] SCHREYER W. Experimental aspects of UHP metamorphism:

- granite system[A]. ERNST W G, LIOU J G. Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-Type Orogenic Belts: Final Report of the Task Group 6 of the International Lithosphere Project[C]. GSA: Bellwether publishing Ltd, 2000. :95-104.
- [19] STOCKHERT B, DU YSTER J, TREPMANN C, et al. Microdiamond daughter crystals precipitated from supercritical CO₂ silicate fluids included in garnet, Erzgebirge, Germany[J]. *Geology*, 2001, 29(5): 391-394.
- [20] YE K, YAO Y, KATA YAMA I, et al. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: new implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss[J]. *Lithos*, 2000, 52: 157-164.
- [21] YAO Y, YE K, LIU J, et al. A transitional eclogite to high pressure granulite-facies overprint on coesite eclogite at Taihang in the Sulu ultrahigh-pressure terrane, Eastern China [J]. *Lithos*, 2000, 52: 109-120.
- [22] LIU J, YE K, MAYU YAMA S, et al. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh pressure zone of the Dabie Mountains, China[J]. *The Journal of Geology*, 2001, 109: 523-535.

THE ROLE OF FLUID FLOW DURING REGIONAL METAMORPHISM

YOU Zhen-dong, ZHONG Zeng-qiu, ZHOU Han-wen

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: There are 4 lines of evidences for fluid flow during the regional metamorphism, respectively: (1) veins; (2) petrology; (3) stable isotopes; (4) metasomatism of major elements. Mobile fluids play an essential role in rock deformation and metamorphic reactions during the various grades of metamorphism. In some of the high-grade metamorphism even partial melting can occur. During the ultrahigh-pressure metamorphism fluids are scarce, however, the study of the Dabieshan UHP metamorphic belt had noticed that the evolution of the metamorphic fluids was obviously periodical. Melt inclusions within UHP metamorphic minerals have been reported. The influx of aqueous fluid had caused a series of retrogressive processes and the geochemical variation of major elements, which clearly depicts the uplifting of the UHP metamorphic rocks into the mid-lower crust. Recent results of experimental petrology show that the (OH)-bearing minerals, such as phengite and amphiboles are stable even deep-subducted to more than 100 km. The experiment of granite system reveals the presence of supercritical fluids in the UHP metamorphic conditions. Their evolution provides an explanation for the incomplete preservation of the UHP metamorphic assemblages in the deep-subducted granites and gneisses.

Key words: metamorphism; fluid flow; ultrahigh-pressure metamorphism; supercritical fluids