科学通报 2013 年 第 58 卷 第 22 期：2215 ~ 2221
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

大别山超高压榴辉岩与片麻岩的脱水熔融：从实验模拟到显微观测

刘强[①*]，吴耀[②]

① 中国地质大学(武汉)地球科学学院，武汉 430074;
② 中国地质大学，地质过程与矿产资源国家重点实验室，武汉 430074
* 联系人, E-mail: liuqiang@cug.edu.cn

2013-05-16 收稿, 2013-07-11 接受; 2013-07-31 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2009CB825003)和国家自然科学基金(40802046, 41272078)资助

摘要 为了查明榴辉岩中以多硅白云母脱水分解为先导的部分熔融作用，采用大别山碧溪岭超高压榴辉岩为初始物质，在 1.5~3.0 GPa 和 800~950℃下进行封闭体系的脱水熔融实验. 在 1.5~2.0 GPa 下，含 5%多硅白云母榴辉岩初始熔融温度为 800~850℃，形成熔融比例~3%的花岗质熔体. 温度和压力变化对多硅白云母脱水熔融反应产物具有明显控制作用，不同实验条件下可形成更长石、石榴石、钾长石和硬玉等. 实验结果对于分析大别-苏鲁地区超高压岩石的部分熔融现象具有指导意义. 以此为基础，在双河超高压榴辉岩石榴石中识别出绿帘石等 3 类多晶包裹体. 其中，钾长石+石英包裹体代表寄主岩石中微量熔体迁移结晶的产物，其成分特征表明受到多硅白云母脱水熔融作用控制. 矿物组合特征指示熔融反应为：Ph+Omp±Qz→Amp±Grt+Melt(Kfs+Qz+Pl)，这与脱水熔融实验结果具有较好类比性. 为了对比超高压片麻岩中的脱水熔融作用，在含石榴石超高压副片麻岩中观察到以多硅白云母为主的 3 类包裹体与长英质包裹体，分别对应于片麻岩内多硅白云母脱水分解、初始熔融和完全熔融等不同阶段. 石榴石成分变化表明，帘石矿物对片麻岩内多硅白云母脱水熔融具有重要作用. 使用锆石 Ti 温度计与锆石中多硅白云母包裹体进行估算，获得片麻岩中脱水熔融条件为 2.0~2.5 GPa 和 783~839℃. 研究结果显示，由实验结果分析到显微观察验证，表明多硅白云母脱水熔融对大别山超高压榴辉岩和片麻岩中微尺度的熔/流体活动具有明显控制意义，寄主岩石内的低度部分熔融对其流变学性质改变产生相应影响.

关键词
脱水熔融
多硅白云母
高温高压实验
多晶包裹体
超高压变质
大别山

近年来，实验岩石学[1~3]、地球化学[4~6]和同位素年代学[7~9]等研究表明，超高压岩石在折返过程中可发生脱水熔融. 这种以物质调整与成分变化为主导的深熔作用对于认识碰撞造山带深部熔/流体活动、流变学性质改变具有重要意义[10~13]. 例如，发生脱水熔融的超高压岩石对于提高应变速率、促使熔体与残余体分离、增加岩石浮力等具有明显影响并导致应变局部化[14]. 当前，在超高压岩石脱水熔融识别标志[15~20]、发生条件与规模、差异性对比以及平元素迁移、流变学性质耦合等方面仍需要进行深入探索.

在超高压岩石部分熔融过程中，多硅白云母、黝帘石/绿帘石等矿物的脱水分解具有关键作用. 为了合理解释现有岩石学研究中的熔融记录以及辨别不同变质条件的反应产物，非常有必要查明不同含水矿物随温压条件变化的脱水分解特征及对寄主岩石

引用格式: 刘强，吴耀. 大别山超高压榴辉岩与片麻岩的脱水熔融：从实验模拟到显微观测. 科学通报, 2013, 58: 2215–2221
英文版见: Liu Q, Wu Y. Dehydration melting in the Dabie UHP eclogite and paragneiss: Evidence from laboratory experiment to natural observation. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-6075-9

初始熔融的影响, 而高温高压实验是有效的正演研究手段, 其结果可用于指导分析天然现象. 在天然观测方面, 超高压岩石主要矿物中的多晶包裹体能够较好地保留岩石变质演化信息, 特别是在微观尺度上记录寄主岩石中低度部分熔融作用[17~21], 能够补充和验证实验结果. 因此, 将高温高压实验与天然观测相结合, 是研究超高压岩石部分熔融作用的重要途径. 本文梳理多硅白云母榴辉岩脱水熔融实验的主要结果[22], 并介绍大别山双河地区超高压榴辉岩与片麻岩中代表脱水熔融作用的多晶包裹体特征, 为确定超高压岩石快速折返过程中部分熔融的起因、过程及相关效应提供可靠的实验与观测证据.

文中和图中矿物代号采用 Whitney 和 Evans[23].

1 含多硅白云母榴辉岩脱水熔融的实验约束

超高压榴辉岩中含水矿物(如多硅白云母和黝帘石等)熔融反应结构可以记录岩石在快速折返中脱水熔融形成和演化过程, 为研究超高压榴辉岩的脱水熔融作用提供了重要参考对象. 本研究模拟超高压岩石折返过程的温压条件, 以大别山碧溪岭超高压榴辉岩为实验初始物质, 在 1.5~3.0 GPa 和 800~950℃下观察榴辉岩中多硅白云母的脱水熔融特征[22].

在 1.5~2.0 GPa 和 800~850℃下, 多硅白云母和黝帘石在亚固相下析出流体, 体系中易熔组分优先熔融, 蓝晶石形成斜长石反应边. 黝帘石在 800℃下发生熔融: Zo+Omp+Qz→Pl+Melt(图 1(a)), 多硅白云母

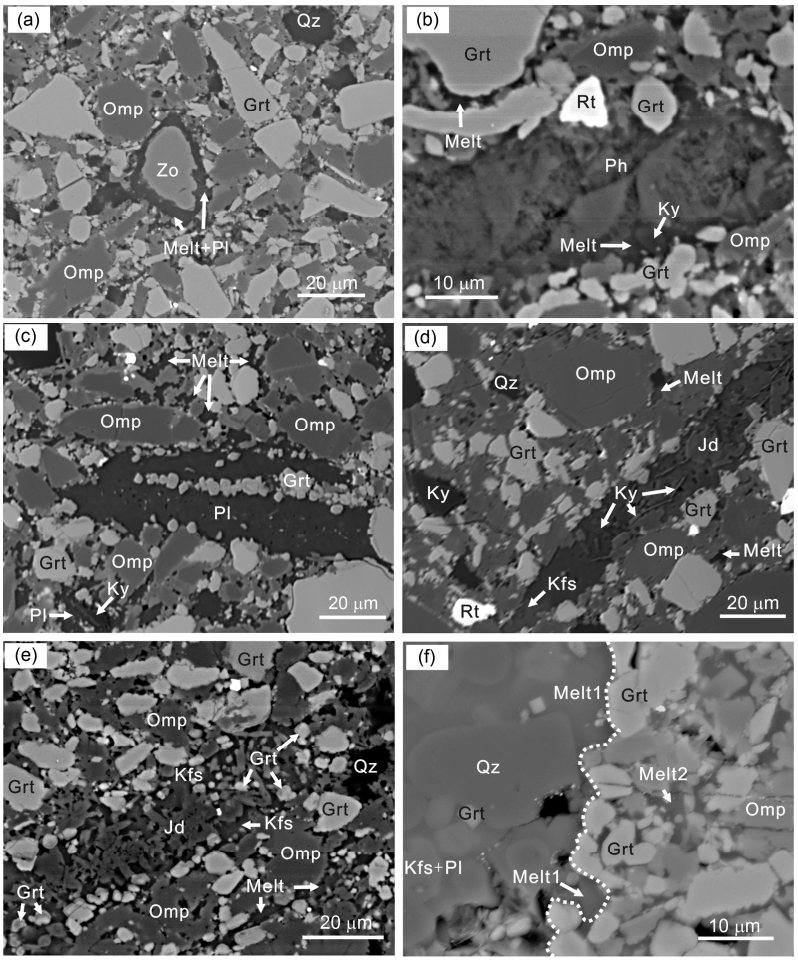


图 1 1.5~3.0 Gpa 和 800~950℃下多硅白云母榴辉岩的脱水熔融结构[22,24]

(a) 黝帘石脱水熔融, 形成斜长石+熔体环边(1.5 GPa/800℃); (b) 多硅白云母边部脱水熔融, 形成蓝晶石+熔体(2.0 GPa/850℃); (c) 多硅白云母完全熔融, 形成更长石+石榴石(2.0 GPa/950℃); (d) 多硅白云母熔融形成硬玉+钾长石+蓝晶石(2.4 GPa/950℃); (e) 多硅白云母熔融形成硬玉+钾长石+石榴石(3.0 GPa/950℃); (f) 黑云母片麻岩部分熔融度较高(左侧), 其熔体(Melt1)交代榴辉岩(右侧)(2.0 GPa/950℃). Grt, 石榴石; Omp, 绿辉石; Qz, 石英; Zo, 黝帘石; Pl, 斜长石; Ky, 蓝晶石; Rt, 金红石; Ph, 多硅白云母; Jd, 硬玉; Kfs, 钾长石; Melt, 熔体

则在 850℃下发生熔融: Ph+Qz→Ky+Melt (图 1(b)). 随着温度升高, 体系内熔体比例增加, 熔体由含水矿物边部逐渐扩展至反应体系内, 代表性熔融反应为: Ph+Omp+Qz→Pl+Ky+Melt, 斜长石成分为更长石. 随着温度升高(如 2.0 GPa, 950℃), 多硅白云母完全熔融, 通过反应 Ph+Omp+Qz→Pl+Grt+Ky+Melt 形成石榴石(图 1(c)); 在 2.4~3.0 GPa 和 900~950℃下, 根据相关系和结构特征, 确定多硅白云母熔融反应为: Ph+Omp+Qz→Jd+Grt+Kfs+Ky+Melt (图 1(d), (e)).

实验结果表明, 温度和压力变化对多硅白云母脱水熔融反应具有明显控制作用, 熔融可以形成低密度花岗质熔体, 这对于榴辉岩内的熔/流体活动与元素迁移具有重要影响. 根据实验资料, 我们推断大别-苏鲁地区超高压榴辉岩发生脱水熔融的适合温压条件应当为 1.5~2.0 GPa 和 800~850℃. 通过对比相同实验条件下(2.0 GPa 和 800~950℃)黑云母片麻岩熔融结果, 片麻岩与榴辉岩脱水熔融过程明显不同. 例如, 在 2.0 GPa 和 950℃下, 黑云母片麻岩中熔体比例(~10%)明显超过榴辉岩(~5%)(图 1(f)), 片麻岩熔体交代作用可使榴辉岩成分趋向富硅与富碱[24].

2 超高压榴辉岩低度熔融的多晶包裹体证据

大别山双河地区榴辉岩主要出露有块状(新鲜)榴辉岩和条带化榴辉岩两种类型. 根据块状榴辉岩矿物组合特征(Grt+Omp+Coe/Qz+Rt)并利用金红石 Zr 温度计[25](Zr=80~138 μg g^{-1}), 我们获得榴辉岩峰期变质条件为 3.5~4.0 Gpa 和 650~700℃. 变质演化研究显示[26], 双河榴辉岩在 2.0~2.5 GPa 下经历过高温(780~840℃)变质作用, 表明岩石具有部分熔融的可能性. 相对于块状榴辉岩, 条带化榴辉岩可能叠加剪切变形作用, 能够较好地保留部分熔融的显微证据. 在 Gao 等人[17]观察的基础上, 我们在条带化榴辉岩富石榴石层和石榴石+石英层的石榴石中观察到 3 种类型多晶包裹体(图 2(a)~(d)), 为榴辉岩折返过程的脱水熔融作用提供了新约束.

第 1 类多晶包裹体以多硅白云母、绿帘石等矿物为主. 包裹体中多硅白云母 Si=3.58 p.f.u.(O=11), 边部出现角闪石和白云母, 表明该矿物存在脱水分解作用(图 2(e)); 绿帘石包裹体边部出现 Zo+Amp+Qz 组合, 内部保留有绿辉石($Jd_{60}Aug_{40}$)(图 2(f)), 可能代表硬柱石在折返初期经历脱水分解反应(Lws+Omp=Ep/Zo+Qz+Amp+Fluid).

第 2 类包裹体主要组成矿物为 Kfs+Qz, 包裹体具有规则几何形状, 出现在寄主石榴石核部或者边部(图 2(g)), 内部多发育有孔隙构造, 外围具有明显的放射状裂纹, 局部发育入射(off-shoot)构造(图 2(h)). 包裹体内钾长石与石英交叉共生, 二者组成比例相近, 不具有优选方位. 结构特征表明, 钾长石和石英应当代表长英质熔体脱水结晶产物, 迁移结晶作用导致寄主石榴石脆性破裂形成放射状裂纹, 后期可受到退变质流体改造. 上述认识得到含残留多硅白云母多晶包裹体观察结果的证实(图 2(i)), 该包裹体内保留 Ph+Amp+Qz+Kfs+Pl 组合, 证明榴辉岩内存在有多硅白云母脱水熔融作用, 熔融反应表示为: Ph+Omp±Qz→Amp±Grt+Melt. 熔体特征可根据 Qz+Kfs+Pl 组合进行重建, 具有花岗质成分特征, 这与 Kfs+Qz 包裹体成分和实验结果[22]具有良好吻合性, 并表明寄主榴辉岩的脱水熔融作用条件应为 1.5~2.0 GPa 和 750~800℃.

第 3 类包裹体内矿物种类较多, 主要组成矿物以 Amp+Pl(化学成分与基质中后成合晶相同)为主, 也包含黑云母、钾长石、绿泥石等矿物(图 2(j)). 包裹体以圆形为主, 外围不发育放射状裂纹. 此类包裹体的矿物组成主要为退变质过程产物.

为了较好地测定榴辉岩中微量熔体的成分特征, 使用 LA-ICP-MS 对 Kfs+Qz 包裹体进行微量元素分析. 分析结果表明, Kfs+Qz 包裹体富集 LILE, LREE 和低 HREE, 具有 Ce 负异常, $\sum REE=6.6\sim60\times10^{-6}$, $(La/Sm)_N=1.1\sim5.1$, 具有花岗质熔体特征[27]. 结合其 K 和 LILE 的特征, 表明此类熔体受到岩石中多硅白云母脱水熔融作用控制, 与已有研究结果具有良好的吻合性[28]. 野外观察结果表明, 岩石内部分熔融程度很低, 但低度熔融作用可能会对岩石流变学性质产生明显影响, 如形成富石榴石层等成分分层.

3 超高压片麻岩脱水熔融的包裹体证据

为了对比超高压榴辉岩与片麻岩脱水熔融作用的差异性, 我们对与榴辉岩互层产出的含石榴石副片麻岩进行显微观察. 在黝帘石、斜黝帘石和石榴石中分别识别出 3 类以多硅白云母为主的包裹体(Ph, Ph+Kfs+Ky, Ph+Grt+Kfs)和 Kfs+Qz 包裹体.

第 1 类包裹体由多硅白云母组成, 保留在褐帘石周围的黝帘石环边中(图 3(a),(b)), 偶尔出现蓝晶石, 多硅白云母中 Si=3.55 p.f.u.(O=11); 第 2 类包裹体矿物组成为 Ph+Kfs+Ky, 主要出现在斜黝帘石边部

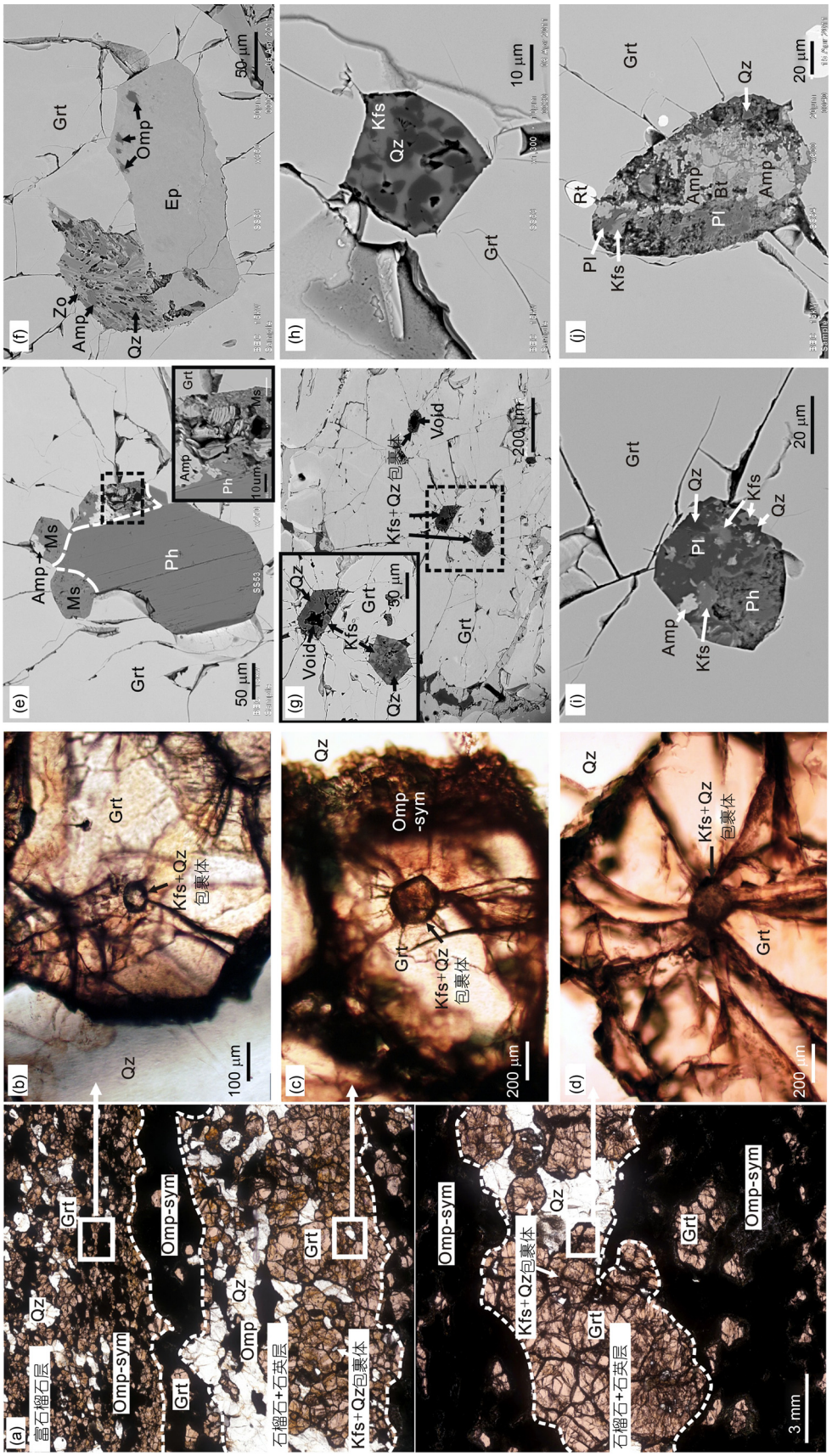


图 2 大别山双河超高压榴辉岩石榴石中多晶包裹体

(a) 条带化榴辉岩中不同的成分层(富石榴石层和石英+石榴石层); (b)~(d)富石榴石层与石英+石榴石层中石榴石中的多晶包裹体; (e) 多硅白云母包裹体，边部出现白云母与角闪石; (f) 绿帘石包裹体，边部出现黝帘石、石英与角闪石; (g), (h) 石榴石中的钾长石+石英包裹体，包裹体发育“入射”构造; (i) 石榴石中多硅白云母与斜长石、钾长石、石英和角闪石的包裹体，指示多硅白云母发生脱水熔融; (j) 石榴石中斜长石+钾长石+石英+黑云母+角闪石的包裹体，指示后期退变质反应. Ms, 白云母; Amp, 角闪石; Ep, 绿帘石; Bt, 黑云母; sym, 后成合晶

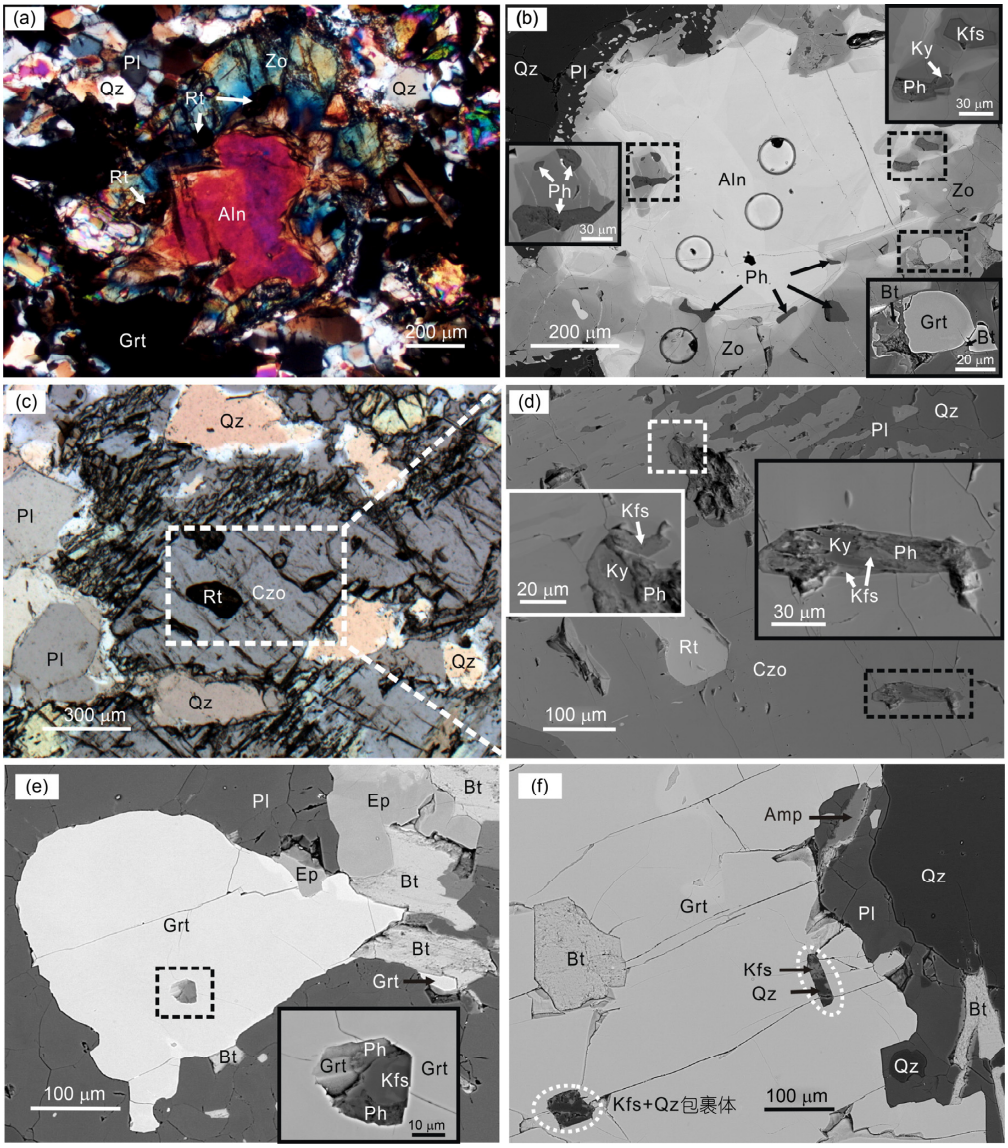


图 3　大别山双河超高压片麻岩中多硅白云母多晶包裹体与长英质包裹体

(a), (b) 黝帘石环边中多硅白云母包裹体, 包括多硅白云母+蓝晶石、石榴石+黑云母包裹体; (c), (d) 斜黝帘石中多硅白云母+蓝晶石+钾长石包裹体; (e) 石榴石中多硅白云母+石榴石+钾长石包裹体; (f) 石榴石中钾长石+石英包裹体, 与黑云母包裹体共生. Aln, 褐帘石; Czo, 斜黝帘石

(图 3(c),(d)), 多硅白云母中 Si=3.20 p.f.u.(O=11). 由于包裹体内不存在明确的熔体相, 对比实验结果(如图 1(d))[22], 判定此类包裹体反应多硅白云母早期脱水分解特征, 其反应为: Ph→Kfs+Ky+Fluid; 第 3 类包裹体由 Ph+Grt+Kfs 组成, 呈等轴状保留在基质石榴石边部, 多硅白云母中 Si=3.37 p.f.u.(O=11). 相对于寄主石榴石成分($Alm_{54.5}Grs_{33.0}Pyr_{9.2}Spess_{2.1}$), 包裹体内石榴石钙铝榴石分子相对升高. 包裹体内钾长石具有矿物交生特征(图 3(e)), 应当代表包裹体内熔体结晶产物. 由于石榴石通常作为多硅白云母脱水熔融反应产物[1,22](如图 1(c),(e)), 该类型包裹体应指示片麻岩中多硅白云母的脱水熔融反应为: Ph+Grt Ⅰ → Grt Ⅱ +Kfs (Melt).

Kfs+Qz 包裹体出现在粗粒石榴石中, 与黑云母包裹体伴生(图 3(f)). 寄主石榴石成分特征为 $Alm_{50.3}Grs_{37.1}Pyr_{8.7}Spess_{2.5}$, 具有由核部向边部、钙铝榴石分子升高特征. 这种矿物组合特征与实验结果具有较好一致性[1], 代表片麻岩中存在多硅白云母在较高温度条件下的脱水熔融. 结合石榴石成分特征与基质中矿物相组合特征(如图 3(e)), 推测熔融反应为:

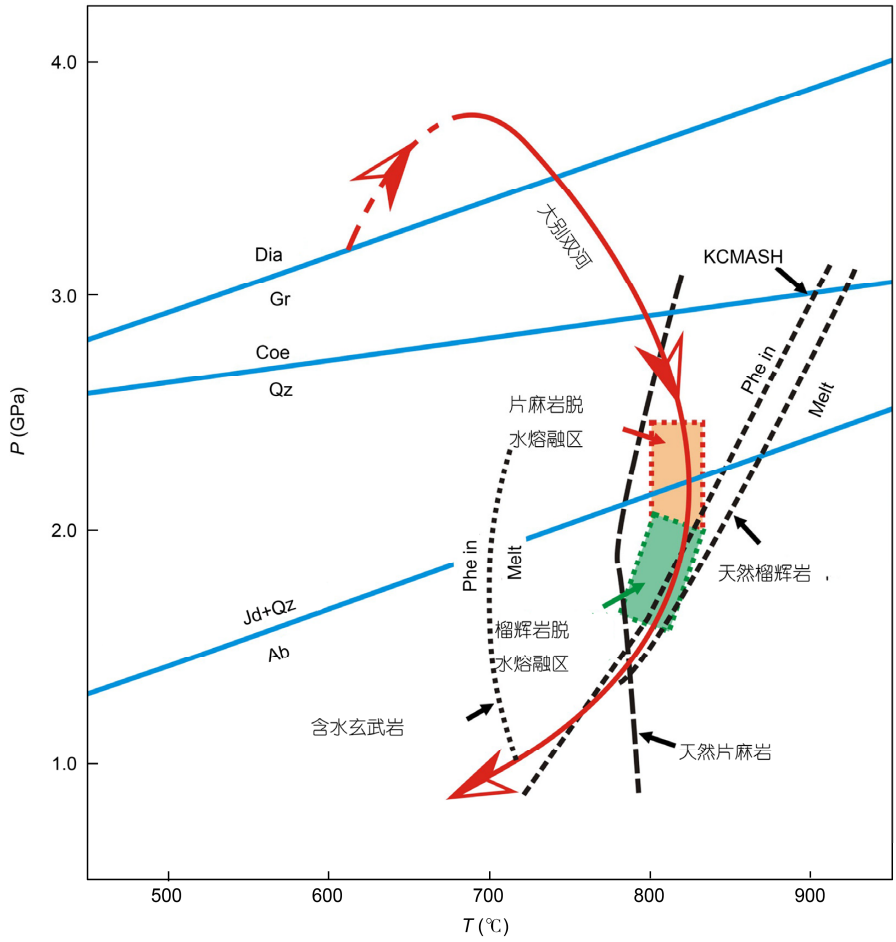


图 4 大别山双河超高压榴辉岩与副片麻岩折返过程中脱水熔融区间对比

岩石折返 *P-T* 轨迹参考 Gao 等人[26], 不同反应体系中多硅白云母脱水分解曲线分别据 Schmidt 和 Poli[30](含水玄武岩), Hermann 和 Green[31] (KCMASH), Auzanneau 等人[1](天然片麻岩)和刘强等人[22](天然榴辉岩). Dia, 金刚石; Gr, 石墨; Coe, 柯石英; Ab, 钠长石

Ph+Qz±Ep→Grt+Bt+Melt(Kfs+Qz). 总体上, 3 类含多硅白云母多晶包裹体与 Kfs+Qz 包裹体, 可对应于片麻岩内多硅白云母的脱水分解、初始熔融与完全熔融等不同阶段, 构成了超高压片麻岩内多硅白云母完整的脱水熔融过程.

使用锆石 Ti 温度计[29](Ti=15.8~27.7 μg g^{-1})并结合锆石中多硅白云母包裹体成分特征(Si=3.37~3.51 p.f.u., O=11), 估算片麻岩中部分熔融作用条件为 783~839℃和 2.0~2.5 GPa, 相当于石英榴辉岩相, 稍高于超高压榴辉岩脱水熔融区间(图 4).

参考文献

1 Auzanneau E, Vielzeuf D, Schmidt M W. Experimental evidence of decompression melting during exhumation of subducted continental crust. Contrib Miner Petrol, 2006, 152: 125–148

2 Schmidt M W, Vielzeuf D, Auzanneau E. Melting and dissolution of subducting crust at high pressures: The key role of white mica. Earth Planet Sci Lett, 2004, 228: 65–84

3 Skjerlie K P, Patino Douce A E. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa: Implication for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes. J Petrol, 2002, 43: 291–314

4 Hermann J, Spandler C, Hack A, et al. Aqueous fluids and hydrous melts in high-pressure and ultra-high pressure rocks: Implications for element transfer in subduction zones. Lithos, 2006, 92: 399–417

5 Zhao Z F, Zheng Y F, Chen R X, et al. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 5244–5266
6 Xia Q X, Zheng Y F, Zhou L G. Dehydration and melting during continental collision: Constraints from element and isotope geochemistry of low-T/UHP granitic gneiss in the Dabie orogen. Chem Geol, 2008, 247: 36–65
7 Wallis S, Tsuboi M, Suzuki K, et al. Role of partial melting in the evolution of the Sulu (eastern China) ultrahigh-pressure terrane. Geology, 2005, 33: 129–132
8 Zong K Q, Liu Y S, Hu Z C, et al. Melting-induced fluid flow during exhumation of gneisses of the Sulu ultrahigh-pressure terrane. Lithos, 2010, 120: 490–510
9 Liu F L, Robinson P T, Liu P H. Multiple partial melting events in the Sulu UHP terrane: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within amphibolite and gneiss. J Metamorph Geol, 2012, 30: 887–906
10 Labrousse L, Prouteau G, Ganzhorn A C. Continental exhumation triggered by partial melting at ultrahigh pressure. Geology, 2011, 39: 1171–1174
11 Hacker B R, Kelemen P B, Behn M D. Differentiation of the continental crust by relamination. Earth Planet Sci Lett, 2011, 307: 501–516
12 Zhang Z M, Shen K, Liou J G, et al. Fluid-rock interactions during UHP metamorphism: A review of the Dabie-Sulu orogen, east-central China. J Asian Earth Sci, 2011, 42: 316–329
13 Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Earth-Sci Rev, 2011,107: 342–374
14 Ernst W G. Preservation/exhumation of ultrahigh-pressure subduction complexes. Lithos, 2006, 92: 321–335
15 Chen Y X, Zheng Y F, Hu Z. Petrological and zirconological evidence for anatexis of UHP quartzite during continental collision in the Sulu orogen. J Metamorph Geol, 2013, 31: 389–413
16 Chen Y X, Zheng Y F, Hu Z. Synexhumation anatexis of ultrahigh-pressure metamorphic rocks: Petrological evidence from granitic gneiss in the Sulu orogen. Lithos, 2013, 156-159: 69–96
17 Gao X Y, Zheng Y F, Chen Y X. Dehydration melting of ultrahigh-pressure eclogite in the Dabie orogen: Evidence from multiphase solid inclusions in garnet. J Metamorph Geol, 2012, 30: 193–212
18 曾令森, 刘福来, 梁凤华, 等. 苏鲁榴辉岩钾长石+石英聚合体中重晶石矿物及其意义. 科学通报, 2007, 52: 2312–2318
19 曾令森, 陈振宇, 陈晶. 苏鲁超高压榴辉岩长英质多晶包裹体中盐类固体包裹体. 科学通报, 2012, 57: 2972–2979
20 曾令森, 梁凤华, Asimow P, 等. 深俯冲陆壳岩石部分熔融与苏鲁超高压榴辉岩中长英质多晶包裹体的形成. 科学通报, 2009, 54: 1826–1840
21 Holness M B, Cesare B, Sawyer E W. Melted rocks under the microscope: Microstructures and their interpretation. Elements, 2011, 7: 247–252
22 刘强, 金振民, 章军锋. 1.5~3.0 GPa 压力条件下多硅白云母榴辉岩的脱水熔融实验研究. 科学通报, 2009, 54: 1455–1464
23 Whitney D L, Evans B W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. Am Mineral, 2010, 95: 185–187
24 Liu Q, Wu Y, Zhang J F. Experimental investigation on low-degree dehydration partial melting of biotite gneiss and phengite-bearing eclogite at 2 GPa. J Earth Sci, 2011, 22: 677–687
25 Tomkins H S, Powell R, Ellis D J. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. J Metamorph Geol, 2007, 25: 703–713
26 Gao X Y, Zheng Y F, Chen X R. U-Pb ages and trace elements in metamorphic zircon and titanite from UHP eclogite in the Dabie orogen: Constraints on *P-T-t* path. J Metamorph Geol, 2011, 29: 721–740
27 Wang Q, Wyman D A, Xu J F, et al. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 2609–2636
28 Gao X Y, Zheng Y F, Chen Y X, et al. Trace element composition of continentally subducted slab-derived melt: Insight from multiphase solid inclusions in ultrahigh-pressure eclogite in the Dabie orogen. J Metamorph Geol, 2013, 31: 453–468
29 Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. Contrib Miner Petrol, 2006, 151: 413–433
30 Schmidt M W, Poli S. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. Earth Planet Sci Lett, 1998, 163: 361–379
31 Hermann J, Green D H. Experimental constraints on high pressure melting in subducted crust. Earth Planet Sci Lett, 2001, 188: 149–168