

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

刘强, 金振民, 章军锋

中国地质大学地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

E-mail: liuqiang@cug.edu.cn

2008-11-10 收稿, 2009-01-04 接受

国家自然科学基金(批准号: 40802046, 90714005)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB825003)和地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(编号: GPMR200610)资助项目

摘要 以大别山东部碧溪岭超高压变质榴辉岩为实验样品, 使用活塞圆筒式高温高压装置, 在 1.5~3.0 GPa, 800~950 °C 下进行封闭体系的脱水熔融实验. 结果表明: (1) 1.5~2.0 GPa 下, 含 5%多硅白云母榴辉岩的初始熔融温度(T_m) ≤ 800~850 °C, 熔融形成比例为 3%的花岗质熔体; (2) 随着温度和压力变化, 榴辉岩中多硅白云母脱水熔融形成不同反应产物. 1.5~2.0 GPa 和 800~850 °C 下, 多硅白云母和黝帘石在亚固相下析出流体使岩石部分熔融, 蓝晶石形成斜长石反应边; (3) 随着温度升高, 多硅白云母与绿辉石、石英发生熔融反应, 形成更长石、蓝晶石和熔体, 更长石是多硅白云母在榴辉岩中主要的脱水熔融反应产物; (4) 1.5~3.0 GPa, ≥ 900 °C 的脱水熔融反应形成镁铝榴石分子较高(37.67%~45.94%)的新生石榴石; 在 2.4~3.0 GPa, ≥ 900 °C 下, 反应产物中形成钾长石和硬玉, 代表反应体系处于更高压力下的流体不饱和状态. 实验初步约束了 1.5~3.0 GPa 下多硅白云母榴辉岩的脱水熔融固相线. 将实验结果与大别-苏鲁地区超高压榴辉岩的部分熔融特征相结合, 推断大别-苏鲁多硅白云母榴辉岩在折返过程中发生脱水熔融的压力和温度区间应为 1.5~2.0 GPa, 800~850 °C, 并指示超高压榴辉岩在不同变质相转变过程中可能经历了流体活动性明显不同的部分熔融过程.

关键词
超高压变质
榴辉岩
脱水熔融
多硅白云母
折返
大别-苏鲁造山带

不同尺度下地质观察^[1-7]、实验岩石学模拟^[8,9]和年代学分析^[10,11]的深入研究表明, 超高压岩石在深俯冲大陆折返过程中存在明显的部分熔融作用. 该过程对超高压岩石的物质交换、流变学性质改变等产生重要影响^[11,12-15], 如流体可使“干”的超高压岩石在较低温度下发生部分熔融或退变质. 这无疑对认识大陆深俯冲过程和超高压变质岩折返机制具有重要启示意义^[1]. 目前, 该熔融机制一般解释为超高压含水矿物和名义上无水矿物在超高压峰期变质条件下^[16,17]及超高压岩石折返特定阶段中^[6,18]、通过脱水或羟基出溶析出流体^[17,19]来诱发岩石部分熔融. 由于

多硅白云母、黝帘石/斜黝帘石和硬柱石等是榴辉岩中普遍存在的超高压含水矿物^[20,21], 认识这些含水矿物在超高压变质演化 P - T 轨迹内的稳定性对于了解岩石部分熔融特征具有重要意义. 作为超高压岩石中常见的富钾含水矿物^[5,22], 多硅白云母在 2.3~3.2 GPa的脱水分解温度最为接近榴辉岩初始部分熔融温度^[23]. 因此, 非常有必要查明多硅白云母在不同温压条件下的脱水熔融特征及对寄主岩石起始熔融条件的控制与影响.

近年来, 以多硅白云母脱水分解为主要特征的部分熔融现象在大别-苏鲁地区及CCSD主孔的超高

引用格式: 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

Liu Q, Jin Z M, Zhang J F. An experimental study of dehydration melting of phengite-bearing eclogite at 1.5–3.0 GPa. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0140-4

石榴辉岩和花岗片麻岩中不断识别出来^[3,5-7]。例如,在苏鲁地区榴辉岩中,石榴石和绿辉石中出现细粒钾长石和石英的细晶包裹体,脉状蓝晶石的边部环绕斜长石和石英^[3],超高压榴辉岩中出现绿辉石-蓝晶石-石英等多相矿物脉体^[16];CCSD主孔岩心的榴辉岩和片麻岩中,熔体石英和细粒矿物的长英质脉体分布在粗粒原生矿物间等^[1,6,7]。此外,脱水熔融作用还导致部分超高压岩石的全岩化学成分发生改变^[6]。高温高压实验是模拟岩石部分熔融过程的直接研究手段,能够为天然脱水熔融现象的形成条件和演化过程等提供重要依据。然而,就现有实验资料而言,前人主要进行了榴辉岩中黝帘石脱水熔融^[23]和长英质片麻岩脱水熔融^[9,24]的研究,尚缺乏明确实验对榴辉岩中多硅白云母的脱水熔融结构、脱水熔融过程和反应产物进行有效约束,尤其缺乏柯石英榴辉岩相向角闪岩相转变区间内的模拟实验。为此,本研究模拟超高压岩石折返过程的温压条件,在 1.5~3.0 GPa 和 800~950 °C 下系统研究多硅白云母在榴辉岩中的脱水熔融特征,从而进一步认识超高压榴辉岩中脱水熔融记录所表达的地质信息和意义^[25]。

1 样品处理、实验和分析方法

含多硅白云母的超高压榴辉岩样品(BXL-2-1)采自大别山东部岳西县碧溪岭地区(30°43.68'N, 116°16.97'E)。岩石新鲜致密、具有中细粒粒状变晶结构和弱面理化构造,主要矿物组成为石榴石+绿辉石+石英+多硅白云母+黝帘石+蓝晶石+金红石,全岩和主要单矿物的化学成分列于表 1,样品总含水量估计

在 0.29%。

实验样品为粉碎、挑选后的天然榴辉岩岩石粉末。经JL-1155 激光粒度分布测试仪测定,>92%的样品粉末粒径<15 μm。样品经去吸附水干燥(110 °C, 24 h)后采用h-BN囊管密封。与Pt, Au等材料类似,h-BN一般使用于无机晶体合成的高温高压实验中^[26]。因此,h-BN囊管可较好地确保实验过程中样品处于封闭状态。实验与结果分析全部在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。实验采用新型Quickpress Non-end-loaded活塞-圆筒式高温高压装置,使用S型热电偶(PtRh-Pt)探测温度,误差在±3 °C。1.5~2.4 GPa的实验使用 13mm压力台,3.0 GPa的实验使用 10 mm压力台,实验压力误差为-0.1 GPa。样品套温度梯度较小,固态传压介质组合采用NaCl, MgO和Pyrex玻璃。实验过程的氧逸度控制低于QFM^[23],实验装置和实验方法参照文献^[27]。

实验结束后,快速淬火获得实验样品。样品呈圆柱状,直径为 4 mm,高度为 5 mm。切取样品横截面,磨制成单面高度抛光光片,喷镀碳膜后在Quanta200 环境电子显微镜进行观察,借助二次电子像衬度和能谱分析确定实验产物。通过计点法统计背散射电子图像中熔体的分布面积来估计部分熔融比例。使用JXA-8100 电子探针进行矿物相和熔体的主量元素分析(加速电压 20 kV,束斑直径为 1 μm)。由于熔体在分析过程中容易丢失K和Na,通常情况下采用校正常数和质量平衡计算的方法来校正数据^[23]。本研究采用以下方法来避免熔体中K和Na丢失:将分析

表 1 实验样品(BXL-2-1)全岩与主要单矿物化学成分(%)^{a)}

	全岩	Gt 核部	Gt 边部	Omp	Q	Phe	Zoi	Ky	Rut
含量 ^{b)}		45~52		35	6~9	3~5	1~2	2~3	1
SiO ₂	48.95	39.66	40.15	55.82	—	53.74	39.87	37.70	—
TiO ₂	0.84	0.03	0.05	0.08	—	0.36	0.02	0.04	—
Al ₂ O ₃	16.57	22.35	22.25	12.54	—	26.74	29.23	60.53	—
FeO ^{c)}	11.48	17.39	16.80	2.62	—	1.69	5.42	0.55	—
MgO	7.82	8.41	8.45	8.36	—	4.12	0.59	0.11	—
MnO	0.18	0.38	0.39	0.03	—	0.02	—	0.01	—
CaO	11.47	11.54	11.58	12.57	—	0.01	23.65	0.10	—
Na ₂ O	2.56	0.11	0.19	7.84	—	0.60	0.10	0.02	—
K ₂ O	0.08	—	0.04	0.01	—	10.39	—	0.03	—
总量	100.46	99.90	99.90	99.93	—	97.67	98.88	99.09	—

a) 全岩化学分析使用 X 射线荧光光谱法测定,烧失量 LOI 为 0.5%;单矿物分析使用 JXA-8100 电子探针测定,分析点数为 5~6;所有数据均为重量百分比;Gt,石榴石;Omp,绿辉石;Q,石英;Phe,多硅白云母;Zoi,黝帘石;Ky,蓝晶石;Rut,金红石;b) 矿物含量为薄片矿物的体积百分比,使用计点法统计;c) 为全铁

束斑直径调至为 5 μm , 寻峰计数时间设置为 10 s, 置 K 和 Na 测试为第一序列, 并选取样品中熔体分布明显的不同区域进行 5 次以上测量后取平均值, 这在整体上保证 K 和 Na 的分析数据接近于准确值. 实验条件和实验产物见表 2.

2 实验结果

2.1 脱水熔融过程

在 2.0 GPa 和 800 $^{\circ}\text{C}$, 2.4 GPa 和 800 $^{\circ}\text{C}$ 以及 3.0 GPa 和 900 $^{\circ}\text{C}$ 下, 多硅白云母和黝帘石均具完整晶形, 体系中没有出现熔体, 表明含水矿物在以上实验条件下保持稳定(图 1(a)). 在 2.0 GPa, 800 $^{\circ}\text{C}$, 石榴石和绿辉石接触边界上可观察到薄而均匀的暗化边. 当暗化边延伸与蓝晶石接触后形成反应边(图 1(b)), 这可能指示含水矿物在亚固相下析出流体并迁移活动的过程. 在 2 GPa, 850 $^{\circ}\text{C}$, 实验体系中明显观察到熔体, 部分熔融比例在~3%, 说明该温度值接近或稍高于实验体系的初始部分熔融温度(T_m). 熔体环绕在多硅白云母和黝帘石的边缘(图 1(c), (d)), 或呈团块状分布在绿辉石、石英和石榴石等矿物的接触区域(图 1(d)), 表明熔体形成与含水矿物脱水分解及与相邻矿物(如绿辉石、石英等)熔融反应相关. 随着温度升高, 多硅白云母熔融程度明显增加, 仅残留少数星点状晶体, 体系中熔体比例有所增加(图 1(e)). 进一步再升高温度, 多硅白云母完全熔融. 体系中熔体比例达到~5%, 开始以薄膜形式分布在矿物(如石榴石)边缘, 蓝晶石的反应边厚度有明显增加(图 1(f)).

随着压力增加, 多硅白云母脱水熔融温度明显升高. 例如, 多硅白云母在 3.0 GPa 下初始脱水熔融温度为~900 $^{\circ}\text{C}$. 当温度升高至 950 $^{\circ}\text{C}$, 多硅白云母即完全分解熔融, 形成蓝晶石、钾长石等新生矿物(图 1(g), (h)). 该特征与 1.5~2.0 GPa 下明显不同, 表明压力条件对多硅白云母脱水熔融温度及分解熔融区间具有影响.

2.2 实验结果的平衡分析

实验结果平衡与否是高温高压实验中需要说明的重要问题. 为了使实验结果尽可能接近平衡, 研究者一般采用无机化学粉末、加注流体和延长实验时间等手段^[8], 并通过变换实验时间或加入若干反转实验来检验实验平衡.

本研究中, 以下现象用来判别实验结果(发生脱水部分熔融部分)大致趋近平衡: (1) 本次实验为含水矿物在封闭体系下脱水部分熔融实验, 样品颗粒细小(一般<15 μm)且实验时间在 120~180 h, 这与国际上同类型实验设计^[23,24]近于一致, 可较好地保证实验结果趋向于平衡; (2) 熔融反应中新生成矿物(如蓝晶石、石榴石、硬玉)晶形近于自形, 岩石中熔融结构随温压条件改变而发生变化; (3) 主要矿物相(如绿辉石)和熔体的组分随着温压条件改变而明显变化(讨论见 2.4), 显示温度和压力条件对反应体系产生较强控制作用. 然而, 实验结果中也出现有一些不平衡标志(如绿辉石反应边等), 这可能仅是局部体系不平衡的表现. 因此, 总体上可认为本实验结果大致趋近平衡.

表 2 多硅白云母榴辉岩(BXL-2-1)脱水熔融实验产物^{a)}

序号	实验编号	压力/GPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	实验时间/h	实验产物组合 ^{b)}
1	QP16	3.0	900	120	Gt+Omp+Q+Ky+Phe+Zoi
2	QP17	3.0	950	120	Gt+Omp+Q+Ky+Zoi+Ky- +Jd+Gt- +Kfs+Melt
3	QP14	2.4	800	180	Gt+Omp+Q+Ky+Phe+Zoi
4	QP15	2.4	850	120	Gt+Omp+Q+Ky+Phe+Zoi +Melt ^S
5	QP18	2.4	900	120	Gt+Omp+Q+Ky+Phe ^S +Zoi +Ky- +Jd +Melt
6	QP19	2.4	950	120	Gt+Omp+Q+Ky+Zoi ^S +Ky- +Jd +Gt- +Kfs+Melt
7	QP11	2.0	800	180	Gt+Omp+Q+Ky+Phe+Zoi
8	QP07	2.0	850	180	Gt+Omp+Q+Ky+Phe+Zoi +Pl- +Ky- +Melt ^S
9	QP09	2.0	900	120	Gt+Omp+Q+Ky+Phe ^S +Zoi +Ky- +Pl- +Melt
10	QP10	2.0	950	120	Gt+Omp+Q+Ky+Zoi ^S +Ky- +Pl- +Gt- +Melt
11	QP13	1.5	800	180	Gt+Omp+Q+Ky+Phe+Zoi +Pl- +Melt ^S
12	QP20	1.5	850	180	Gt+Omp+Q+Ky+Phe ^S +Zoi+Ky- +Pl- +Melt
13	QP22	1.5	900	120	Gt+Omp+Q+Ky+Zoi ^S +Ky- +Pl- +Gt- +Melt

a) Gt, 石榴石; Omp, 绿辉石; Q, 石英; Ky, 蓝晶石; Phe, 多硅白云母; Zoi, 黝帘石; Jd, 硬玉; Pl, 斜长石; Kfs, 钾长石; Melt, 熔体;

b) 实验产物组合中上标 S 表示比例微小

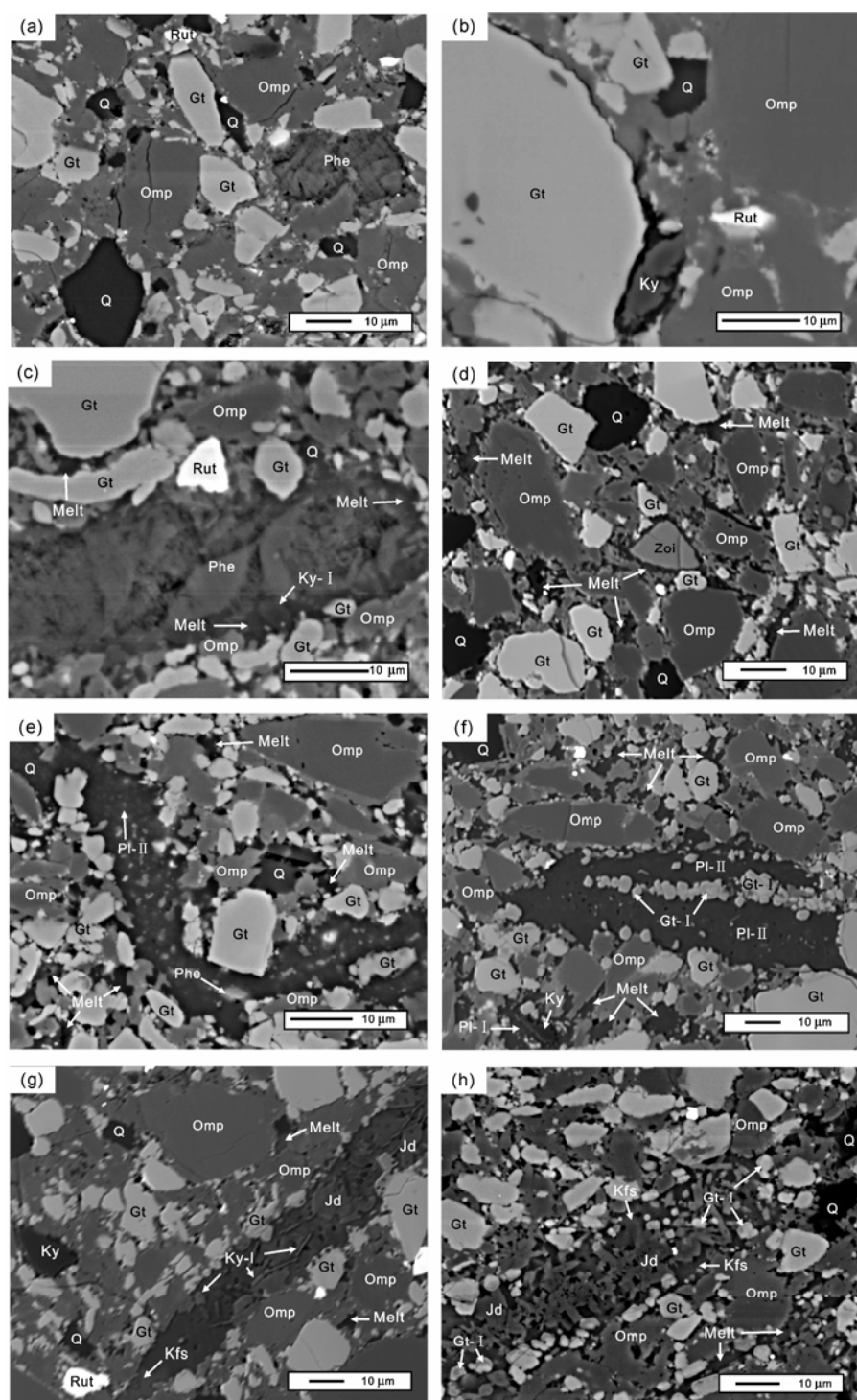


图 1 1.5~3.0 GPa 和 800~950 °C 下天然榴辉岩的脱水熔融结构

所有图像均为 Quanta200 型环境扫描电子显微镜的背散射电子图像, 矿物代号同表 2. (a) 多硅白云母矿物保持稳定, 体系中没有出现熔体(QP16, $P = 3.0$ GPa, $T = 900$ °C); (b) 原生蓝晶石形成熔融反应边(QP11, $P = 2.0$ GPa, $T = 800$ °C); (c) 多硅白云母边部开始熔融, 部分熔体结晶形成蓝晶石(QP07, $P = 2.0$ GPa, $T = 850$ °C); (d) 熔体围绕黧帘石, 局部体系内分布有明显熔体(QP07, $P = 2.0$ GPa, $T = 850$ °C); (e) 多硅白云母熔融程度较高并反应形成更长石, 残留少数星点状晶体(QP09, $P = 2.0$ GPa, $T = 900$ °C); (f) 体系内熔体含量增加, 多硅白云母熔融反应形成更长石、石榴石(QP10, $P = 2.0$ GPa, $T = 950$ °C); (g) 多硅白云母脱水熔融并反应形成硬玉、钾长石和蓝晶石(QP19, $P = 2.4$ GPa, $T = 950$ °C); (h) 多硅白云母脱水熔融并反应形成硬玉、钾长石和石榴石(QP17, $P = 3.0$ GPa, $T = 950$ °C)

2.3 脱水熔融结构和熔融反应

实验结果中矿物相和结构特征表明, 榴辉岩中多硅白云母脱水熔融反应随温度和压力改变而变化。1.5~2.0 GPa和800~850 °C下, 多硅白云母和黝帘石在亚固相下析出流体弥散到体系中。在流体助熔作用下, 体系中易熔组分优先熔融并与相关矿物发生反应, 原生蓝晶石反应边结构即指示了该变质反应过程(图 1(b)), 而且其厚度随温度升高而逐渐增大(图 1(f))。经电子探针和激光拉曼光谱分析, 确定反应边为结晶的更长石矿物。由此推断反应体系的初始脱水熔融反应表示为两个子过程: $Ky+Q+Omp+H_2O \rightarrow Melt$; $Ky+Melt \rightarrow Pl$ 。随着温度升高, 多硅白云母和黝帘石开始直接熔融, 熔体由含水矿物边部逐渐扩展至反应体系内, 分布在不同矿物相接触区域而呈不规则状。通过结构分析和矿物相确定, 有较大比例的熔体已结晶形成更长石(图 1(e), (f)), 该阶段的熔融反应表示为 $Phe+Omp+Q \rightarrow Pl+Ky+Melt$, 更长石成为多硅白云母在榴辉岩中主要的脱水熔融反应产物。新生蓝晶石呈短柱状或纤维状分布在多硅白云母边缘或中心区域(图 1(c), (g))。这种由温度变化形成不同新生矿物的特征表明, 新生矿物相通过从熔融的熔体中直接结晶(如蓝晶石, 图 1(c))及含水矿物与不同矿物相发生熔融反应(如更长石, 图 1(f))来形成。随着温度进一步升高(如 2.0 GPa 和 950 °C), 体系内熔体比例逐渐增加, 多硅白云母完全熔融并通过反应 $Phe+Omp+Q \rightarrow Pl+Gt+Ky+Melt$ 形成新生石榴石。新生石榴石晶形细小并自形(平均在 $5 \mu m \pm$), 出现在斜长石中心或边缘(图 1(f))。

随着压力升高(如 2.4~3.0 GPa和900~950 °C), 反应体系中熔体比例有所减少。脱水熔融产物中形成钾长石矿物, 钾长石不具有明显晶形并分布在已熔融的多硅白云母矿物边缘(图 1(g), (h))。在该压力范围内, 硬玉矿物出现在熔融反应产物中。因此, 2.4 GPa可作为更长石在榴辉岩中稳定存在的压力上限。蓝晶石在该条件下不发育反应边结构(图 1(g))。根据相关系和结构特征, 多硅白云母在 2.4~3.0 GPa和900~950 °C熔融反应表示为 $Phe+Omp+Q \rightarrow Jd+Gt+Kfs+Ky+Melt$ 。这与Greenland 加里东造山带变泥质岩中多硅白云母在柯石英域脱水熔融反应^[4]($Phe+Q = Kfs+Ky+Rt+Melt$)及2.0~2.7 GPa英云闪长岩中多硅白云母脱水熔融反应^[24]($Phe+Q = Kfs+Gt+Melt$)有所差异, 表明单斜辉石(硬玉分子)对多硅白云母在

基性岩中脱水熔融反应具有重要意义。

2.4 主要矿物相和初始熔体组成

更长石(或硬玉)、钾长石、细粒石榴石和蓝晶石是脱水熔融反应中的新生矿物(图 2)。新生石榴石MgO含量在9.94%~11.96%(表 3)。与同条件下原生石榴石相比, 镁铝榴石端元分子升高了约 11.6%, 钙铝榴石端元分子降低约 10.1%, 铁铝榴石和锰铝榴石端元分子变化平缓(降低约 1.5%), 表明多硅白云母完全熔融为其提供MgO。不同条件下绿辉石组分对比显示(表 4), Na_2O 含量随压力增加而升高。在 1.5~2.0 GPa下, 绿辉石中 Al_2O_3 和 Na_2O 随升温而递减, 而CaO、FeO含量有所增加并形成浅色反应边(图 1(e), (f)), 指示硬玉分子在该压力区间内出溶到熔体中, 2.4~3.0 GPa下没有出现类似特征(图 1(g), (h))。由于压力误差影响(实验QP16 和QP17 的实际压力约在2.8~2.9 GPa), 体系中的石英始终以 α 相形式出现。金红石在实验过程中具有较好稳定性, 没有参与熔融反应的特征。黝帘石是实验体系中另一重要含水矿物。熔融过程中, 黝帘石一般形成反应边结构(如图 1(d))(边部为钙长石)并逐步分解熔融。本研究获得的黝帘石脱水熔融特征与Skjerlie和Patino douce^[23]的实验研究结果相一致, 不进行详细描述。

成分对比表明(表 5), 蓝晶石反应边的斜长石与多硅白云母熔融反应形成的斜长石没有明显区别, 种属均为更长石。与标准钾长石相比, 新生钾长石中

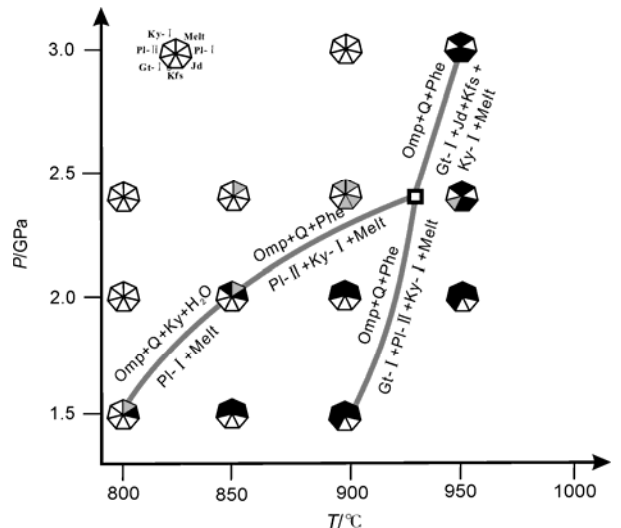


图 2 1.5~3.0 GPa, 800~950 °C下超高压榴辉岩中多硅白云母脱水熔融产物与熔融反应

灰色代表产物比例较小或不明显, 黑色为确定该产物, 空心方括号号为推测的不变点

表 3 不同实验条件下石榴石矿物的化学成分(%)^{a)}

样品号	QP20		QP7		QP10		QP19		QP17		QP22	QP10	QP17
P/GPa; T/	1.5; 850		2.0; 850		2.0; 950		2.4; 950		3.0; 950		1.5; 900	2.0; 950	3.0; 950
	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	核部	核部
SiO ₂	38.92	39.55	39.19	39.14	40.38	40.44	38.96	39.57	39.28	39.42	39.98	40.60	40.14
Al ₂ O ₃	22.65	22.08	22.46	22.47	22.44	22.50	22.40	22.05	22.26	22.24	21.92	22.57	22.12
MgO	8.04	8.30	8.04	8.65	8.38	8.30	8.01	7.84	8.12	8.19	10.20	11.96	9.94
FeO ^{b)}	18.07	17.41	17.85	18.46	15.79	16.60	17.97	18.65	17.58	17.75	17.66	16.81	16.74
CaO	11.15	11.27	11.59	10.10	11.99	11.47	11.90	11.09	11.80	11.54	9.38	6.23	9.37
MnO	0.39	0.36	0.42	0.39	0.38	0.38	0.39	0.40	0.40	0.34	0.40	0.29	0.31
总量	99.20	98.96	99.54	99.18	99.35	99.69	99.62	99.60	99.44	99.47	99.54	98.43	98.63
Alm	38.38	37.04	37.61	39.10	33.98	35.72	37.52	39.48	36.95	37.38	36.59	36.23	35.79
Gross	30.34	30.72	31.29	27.41	33.05	31.62	31.84	30.08	31.78	31.14	24.90	17.20	25.66
Pyrope	30.44	31.47	30.20	32.66	32.14	31.84	29.82	29.59	30.42	30.75	37.67	45.94	37.88
Spess	0.84	0.78	0.90	0.84	0.83	0.83	0.83	0.86	0.85	0.73	0.84	0.63	0.67

a) 单矿物分析在 JXA-8100 电子探针进行, 分析点数均为 3, 最后 3 列为实验产物中新生物石榴石组分, 分析点数为 5~7; Alm, 铁铝榴石; Gross, 钙铝榴石; Pyrope, 镁铝榴石; Spess, 锰铝榴石; b) 为全铁

表 4 不同实验条件下绿辉石及硬玉矿物的化学成分(%)^{a)}

样品号	QP20		QP7		QP10		QP19		QP17		QP17
P/GPa; T/	1.5; 850		2.0; 850		2.0; 950		2.4; 950		3.0; 950		3.0; 950 ^{c)}
	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部	边部	核部
SiO ₂	56.60	55.96	55.73	55.38	57.14	56.47	57.46	55.89	56.75	55.91	56.27
Al ₂ O ₃	11.19	9.82	11.12	10.95	12.14	11.67	12.18	12.31	12.63	12.98	18.38
MgO	8.76	9.65	8.88	9.23	8.21	9.22	7.96	8.39	7.89	7.86	4.49
FeO ^{b)}	2.60	3.91	2.67	2.80	2.32	2.56	2.66	3.50	2.36	2.67	2.74
CaO	13.12	14.12	13.88	14.11	12.81	13.84	12.24	12.95	12.22	11.93	7.64
Na ₂ O	6.97	5.87	6.93	6.78	7.45	6.23	7.62	6.65	7.61	7.46	9.04
总量	99.23	99.25	99.18	99.20	100.07	99.97	100.13	99.70	99.44	98.88	99.27

a) 单矿物分析在 JXA-8100 电子探针上进行, 分析点数均为 3; b) 为全铁; c) 为实验产物中硬玉化学成分

表 5 不同实验条件下长石类矿物的化学成分(%)^{a)}

样品号	QP20		QP22		QP9		QP10		QP19	QP17
P/GPa; T/	1.5; 850		1.5; 900		2.0; 900		2.0; 950		2.4; 950	3.0; 950
	Pl-	Pl-	Pl-	P-l	Pl-	P-l	Pl-	Pl-	Kfs	
SiO ₂	63.51	62.53	65.17	65.26	65.55	67.89	64.67	66.47	67.38	67.82
Al ₂ O ₃	23.40	24.06	21.64	21.51	20.99	20.51	22.53	20.47	18.95	18.41
FeO ^{b)}	0.66	0.85	0.38	0.34	1.05	0.49	0.62	0.49	0.35	1.18
CaO	4.08	4.89	3.03	3.05	3.41	2.13	3.55	2.47	0.45	0.89
Na ₂ O	7.09	6.13	8.66	8.87	6.84	7.52	7.08	8.64	3.68	0.65
K ₂ O	0.58	0.76	0.87	0.93	1.19	1.43	1.23	1.49	9.13	9.37
总量	99.31	99.23	99.76	99.95	99.0	99.6	99.52	100.03	99.94	99.58

a) 单矿物分析在 JXA-8100 电子探针上进行, 分析点数为 6~7, Pl- 示蓝晶石反应边形成, Pl- 示多硅白云母脱水熔融形成, 后两列为实验产物中钾长石的组分; b) 为全铁

SiO₂ 含量稍高, 达到 67.55%(平均值)(表 5), Na₂O 和 K₂O 含量变化显示压力对组分具有很强控制作用。

在 1.5~3.0 GPa 和 850~950 °C, 岩石中初始熔体 SiO₂ 在 67.02%~74.76%, TiO₂+FeO*+MgO = 0.56%~

2.22%, CaO = 0.22%~3.44%, Na₂O+K₂O = 4.04%~8.27% (表 6)。在 Ab-An-Or 标准投图中, 熔体分布在奥长花岗岩(1.5~2.0 GPa)-花岗岩(2.4~3.0 GPa)区域, 总体呈花岗质特点。压力变化对初始熔体中 SiO₂,

表 6 实验所获得初始熔体的化学成分(%)^{a)}

样品号	QP20	QP7	QP15	QP17
P/GPa; T/	1.5; 850	2.0; 850	2.4; 850	3.0; 950
SiO ₂	67.02	73.65	71.77	74.76
TiO ₂	0.10	0.01	0.08	0.12
Al ₂ O ₃	19.03	18.63	19.09	19.51
FeO ^{b)}	0.87	0.35	0.57	1.21
MgO	1.26	0.20	0.74	0.14
CaO	3.44	1.48	1.19	0.22
Na ₂ O	7.22	4.57	1.22	0.26
K ₂ O	1.05	1.05	5.33	3.78
总量	100.00	100.00	100.00	100.00
总量*	95.04	98.88	97.47	96.56
H ₂ O ^{c)}	4.96	1.12	2.53	3.44

a) 分析在 JXA-8100 电子探针进行, 分析点数为 5~7, 所列数值已经归一至 100wt%, 总量*为原始分析总量; b) 为全铁; c) 含水量根据 100%-原始分析总量计算得出

Na₂O, K₂O 和 CaO 具有较强控制作用. 随着压力增加, SiO₂ 含量升高, CaO 含量递减; 压力 ≥ 2.4 GPa, 熔体中 Na₂O 明显递减, 而 K₂O 明显增加, 表明压力变化影响着硬玉分子出溶和多硅白云母熔融对熔体组分的贡献变化.

3 讨论

3.1 与已有实验结果的对比

在已有实验中^[8,9,23,24,28,29], 研究者基于平衡考虑而多采用化学合成体系(如玄武质玻璃+Al(OH)₃^[8]或 KCMASH^[28-30]), 其优点是实验结果尽可能接近岩相平衡. 但由于化学合成物质不具有矿物天然结构, 因此, 此类实验可能缺失岩石部分熔融过程的演化信息. 而目前证实超高压岩石发生脱水部分熔融的直接证据多来自岩石天然结构的观察结果^[3-7], 这为使用天然粉末样品进行实验提供了研究基础.

在熔融反应观察和表达上, 本次结果与化学合成体系^[28,29]及类似初始物^[9,23,24,30]实验结果相类似, 如 KCMASH 体系 >3.0 GPa 的熔融反应表示为: Phe+Cpx+Coe = Gt+Ky+Kfs+Melt^[28]. 这种较好的一致性表明, 实验体系在封闭状态下脱水熔融趋向于平衡, 同时显示使用粉末样品观察矿物熔融结构的优势^[31].

本实验获得多硅白云母在 1.5~2.0 GPa 下脱水熔融温度 ≤ 800~850 , 熔融温度随压力增加而升高, 表明多硅白云母 1.5~3.0 GPa 的脱水熔融曲线为正斜率. 与前人结果比较, 本次多硅白云母脱水熔融温度值高于含水合成体系^[28,29]约 50 , 低于中酸性岩石

体系^[9,24]约 50 .

与黝帘石脱水部分熔融结果相比^[23,32], 本次以多硅白云母为主的脱水熔融实验结果的主要认识为: (1) 实验获得多硅白云母脱水熔融温度接近或稍高于黝帘石(如图 1(c), (d)). 由于前者含水量高于后者约 2%, 导致本次初步约束的岩石脱水熔融固相线低于黝帘石脱水熔融固相线^[23]近 75 (图 3). 因此, 多硅白云母在 1.5~3.0 GPa 下脱水可以使榴辉岩在较低温度下发生熔融. 这可能是天然岩石中能更多观察到多硅白云母脱水形成部分熔融现象的重要原因. (2) 实验显示, 多硅白云母由亚固相脱水至完全熔融是逐步过程并随压力改变而变化, 如在 1.5~2.0 GPa 为 100 , 2.4~3.0 GPa 下则 <50 (图 3). 而同等实验条件下, 黝帘石由脱水至完全熔融的温度区间则较大, 如 1.5~2.0 GPa 为 100~250 , 2.4~3.0 GPa 下为 100~150 ^[23]. 这说明二者脱水性质具有明显差异, 对实验体系部分熔融程度的贡献亦有不同. (3) 实验证明温度和压力变化对不同熔融反应产物的形成具有重要影响. 例如, 压力条件对熔融产物中形成钾长石具有控制意义, 而 >900 高温是生成石榴石的必要条件. 这是以往实验研究所没有明确的变化规律.

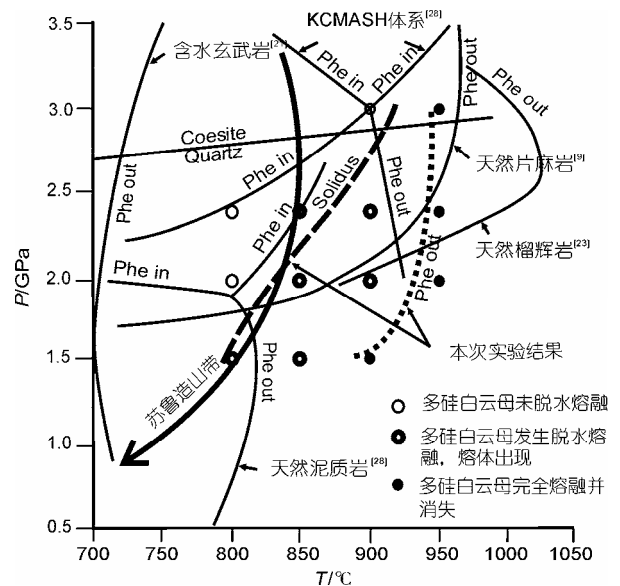


图 3 不同实验条件下的多硅白云母脱水熔融曲线

图中国相线为根据本次实验结果的推测曲线. 多硅白云母分解熔融曲线实验资料分别引自 Auzanneau 等人^[9]、Schmidt 和 Poli^[21]、Skjerlie 和 Patino douce^[23]、Hermann 和 Green^[28]. 其中, Vielzeuf 和 Holloway 实验资料转引自 Hermann 和 Green^[28], 苏鲁造山带超高压岩石折返的 P-T 轨迹引自 Zhang 等人^[33]

3.2 对大陆碰撞过程中榴辉岩部分熔融条件和物质记录的指示意义

在大陆板块俯冲碰撞过程中,俯冲陆壳的深部状态与俯冲洋壳存在明显差异^[20,28,29],如水稳定赋存在含水矿物^[22]和名义上无水矿物中^[34~37]。因此,热结构程度低的大陆板块在经历超高压作用时仅发生有限流体活动并保存峰期变质的矿物学证据^[36~38]。榴辉岩部分熔融实验证明,“干”榴辉岩在 >3.0 GPa下非常耐熔,初始熔融温度 >1200 °C^[39,40],而多硅白云母在 <300 km中等地温梯度的俯冲带内又具有很强的稳定性^[22]。因此,在已知的大陆俯冲 P - T 轨迹内,超高压榴辉岩不大可能发生部分熔融。

本实验表明,压力对多硅白云母脱水分解具有较强控制作用,其脱水熔融温度随压力降低而降低并对岩石固相线具有重要影响。将本实验结果与超高压榴辉岩的“热”折返 P - T 轨迹^[6,33,41,42]相结合(图3),表明超高压榴辉岩脱水部分熔融的最合理压力和温度区间为 $1.5\sim 2.0$ GPa, $800\sim 850$ °C,即石英榴辉岩相角闪岩相转变过程中。这表明,在没有外界流体参与下,依靠超高压变质岩中含水矿物的自身脱水熔融可以导致岩石局部范围内的部分熔融或混合岩化。

在大别-苏鲁超高压岩中,存在钾长石^[3,38]和长英质脉体^[3,6,7]、蓝晶石-石英-绿辉石等多相矿物脉体^[16]、蓝晶石边部形成斜长石^[3]、多硅白云母发育斜长石冠状体^[6,7]等指示岩石中流体活动和部分熔融的矿物学标志。将本实验结果与上述天然现象结合,可获得对熔融过程的更多认识。例如,由于涉及钾的来源和流体活动问题,钾长石是榴辉岩中较少出现的矿物。因为单纯依靠绿辉石中钾形成钾长石需要 ≥ 5.0 GPa的压力^[43],合成体系实验也显示钾长石一般形成在流体缺乏条件下^[28]。本次结果表明,在 ≥ 2.4 GPa, ≥ 850 °C下,榴辉岩部分熔融熔体中钾含量有明显升高。在压力作用下,熔体可更多地溶解体系中的自由流体^[28]而使体系处于流体不饱和状态(如蓝晶石不再形成明显反应边),这使得多硅白云母可以通过脱水熔融形成钾长石。因此,超高压榴辉岩中的钾长石^[3,38]可视为多硅白云母脱水熔融的产物,指示此条件下反应体系处于流体不饱和状态,并暗示榴辉岩由柯石英榴辉岩相向石英榴辉岩相转变过程中可能经历一次局部熔融过程。蓝晶石具有斜长石反应边则指示了另一次反应条件有明显差异的部分熔

融作用。结合 $1.5\sim 2.0$ GPa, $800\sim 850$ °C实验结果,多硅白云母和黝帘石首先在亚固相下脱水,流体在体系中运移和活动导致部分熔融,富钾钠的熔体与蓝晶石发生反应形成斜长石反应边,周边体系中亦分布有明显的熔体残余。因此,蓝晶石的斜长石反应边及长英质脉体^[3]可用以指示榴辉岩在 $1.5\sim 2.0$ GPa和含自由流体条件下的部分熔融过程,表明超高压榴辉岩在石英榴辉岩相角闪岩相转变中经历了流体明显活动的部分熔融作用。这与大别山、欧洲Erzgebirge及Greenland等地的超高压岩石的研究认识^[6,7,44~46]相一致。

3.3 榴辉岩脱水熔融的物质交换和构造物理意义

在超高压榴辉岩中,岩石中钾和 $>90\%$ 的Cs, Rb, Ba等大离子亲石元素富集于多硅白云母矿物中,多硅白云母中的Cs/Rb、Ba/Rb基本代表了原岩中这些微量元素的比率^[47]。因此,多硅白云母脱水熔融对于榴辉岩中K和LILE迁移及流体活动具有重要意义。本实验表明,以多硅白云母为主体的脱水熔融可在岩石内形成花岗质熔体,这种具有较低FeO, MgO, CaO且全碱含量较高的花岗质熔体应以富含K, LILE为特征并可作为K, LILE迁移的主要载体^[17]。由于多硅白云母脱水对超高压榴辉岩在较低温度下形成部分熔融具有重要控制意义,这可为榴辉岩在开放体系下发生物质交换作用提供了物理条件和交代物质特征的约束。

此外,更长石和钾长石是多硅白云母熔融反应的最主要产物。长石类矿物的密度均小于多硅白云母的密度(密度差在 $0.19\sim 0.25$ g/cm³),这势必对榴辉岩局部范围的密度变化产生影响。再加之熔融形成的低黏度熔体可弱化岩石力学强度及改变岩石变形机制^[48,49],这对超高压岩石的快速折返剥露及构造体制变化^[2,50]将会具有一定影响。

4 结论

(1) 温度和压力变化对天然榴辉岩体系中多硅白云母的脱水熔融反应具有明显控制作用。在 $1.5\sim 2.0$ GPa, 多硅白云母和黝帘石在 $800\sim 850$ °C开始析出流体,使榴辉岩在体系相对含水条件下发生局部熔融,蓝晶石形成斜长石反应边。随着温度升高,多硅白云母与绿辉石、石英发生脱水熔融反应,生成斜长石(更长石)、新生蓝晶石和熔体。

(2) 在 $1.5\sim 3.0$ GPa, $900\sim 950$ °C, 多硅白云母脱

水熔融形成镁铝榴石分子在 37.67%~45.94% 的新生石榴石; 在 2.4~3.0 GPa, 900~950 °C, 多硅白云母熔融反应物中钾长石及硬玉指示反应体系处于高压-超高压条件下的流体不饱和状态。

(3) 将实验结果取得的主要认识与大别-苏鲁地

区超高压岩石折返 P - T 轨迹及岩石熔融结构相结合, 推断大别-苏鲁地区超高压榴辉岩发生脱水熔融的合理温压条件为 1.5~2.0 GPa, 800~850 °C; 不同矿物相特征指示榴辉岩在 2.4~3.0 和 1.5~2.0 GPa 下可能经历了流体活动性明显不同的脱水部分熔融过程。

致谢 高温高压实验得到吉林大学无机合成与制备化学国家重点实验室刘晓阳教授的指导和王超博士的帮助, Quanta200 扫描电子显微镜观察得到张素新教授和徐海军博士的帮助, JXA-8100 电子探针分析得到郑曙和刘慧芳工程师的帮助。在 2007 年全国岩石学及地球动力学会议期间, 研究得到郑永飞教授、魏春景教授、刘景波和李红艳研究员的有益指导, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 2008, 53: 2129—2152
- 2 钟增球, 索书田, 张利, 等. 岩石塑性流变学——大别-苏鲁高压超高压变质带的构造学. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007. 59—71
- 3 大别山编写组. 大别山超高压变质作用与碰撞造山动力学. 北京: 科学出版社, 2005. 55—57
- 4 Lang H M, Gilotti J A. Partial melting of metapelites at ultrahigh-pressure conditions, Greenland Caledonides. *J Metamorph Geol*, 2007, 25: 129—147[DOI]
- 5 Nakamura D. Stability of phengite and biotite in eclogites and characteristics of biotite- or orthopyroxene-bearing eclogites. *Contrib Mineral Petrol*, 2003, 145: 550—567[DOI]
- 6 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[DOI]
- 7 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[DOI]
- 8 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[DOI]
- 9 Auzanneau E, Vielzeuf D, Schmidt M W. Experimental evidence of decompression melting during exhumation of subducted continental crust. *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 152: 125—148[DOI]
- 10 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[DOI]
- 11 Wawrzenitz N, Romer R L, Oberhänsli R, et al. Dating of subduction and differential exhumation of UHP rocks from the Central Dabie Complex (E-China): Constraints from microfabrics, Rb-Sr and U-Pb isotope systems. *Lithos*, 2006, 89: 174—201[DOI]
- 12 Davies J H, Blanckenburg F V. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 129: 85—102[DOI]
- 13 邓晋福, 戴圣潜, 吴宗絮, 等. 大别造山带岩石学结构和热结构及其地质意义. 地质学报, 2000, 74: 206—215
- 14 Vanderhaeghe O, Teyssier C. Partial melting and flow of orogens. *Tectonophysics*, 2001, 342: 451—472[DOI]
- 15 马昌前, 余振兵, 张金阳, 等. 地壳根、造山热与岩浆作用. 地学前缘, 2006, 13: 130—139
- 16 Zhang Z M, Shen K, Sun W D, et al. Fluids in deeply subducted continental crust: Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 3200—3228[DOI]
- 17 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[DOI]
- 18 Miller J A, Buick I S, Cartwright I, et al. Fluid processes during the exhumation of high- P metamorphic belts. *Mineral Mag*, 2002, 66: 93—119[DOI]
- 19 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci Rev*, 2003, 62: 105—161[DOI]
- 20 Poli S, Schmidt M W. The high-pressure stability of hydrous phase in orogenic belts: An experimental approach on eclogite-forming processes. *Tectonophysics*, 1997, 273: 169—184[DOI]
- 21 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[DOI]
- 22 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. *Lithos*, 2000, 52: 51—77[DOI]
- 23 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[DOI]
- 24 Patino Douce A E. Vapor-absent melting of tonalite at 15—32 kbar. *J Petrol*, 2005, 46: 275—290[DOI]
- 25 Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. *Tectonophysics*, 2009, 464, doi: 10.1016/j.tecto.2008.09.014[DOI]
- 26 Liu X Y, Rau F, Breu J, et al. Studies on AB₂-type intermetallic compounds, ¹. High-pressure synthesis and crystal structure of scandium dizinc ScZn₂. *J Alloys Compounds*, 1996, 243: L5—L7[DOI]
- 27 Wang C, Liu X, Fleet M E. High-pressure synthesis and single-crystal structure refinement of gadolinium holmium silicate hydroxyapatite Gd_{4.33}Ho_{4.33}(SiO₄)₆(OH)₂. *J Solid State Chem*, 2006, 179: 2245—2250[DOI]
- 28 Hermann J, Green D H. Experimental constraints on high pressure melting in subducted crust. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 188: 149—168[DOI]
- 29 Hermann J. Experimental constraints on phase relations in subducted continental crust. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143: 219—235[DOI]
- 30 Okamoto K, Maruyama S. Multi-anvil re-equilibration experiments of a Dabie Shan ultrahigh-pressure eclogite within the diamond-stability fields. *Island Arc*, 1998, 7: 52—69[DOI]
- 31 杨晓松, 金振民, Huenges E, 等. 喜马拉雅黑云斜长片麻岩脱水熔融实验: 对青藏高原地壳深熔的启示. *科学通报*, 2001, 46: 246—250
- 32 Hermann J. Allanite: Thorium and light rare earth element carrier in subducted crust. *Chem Geol*, 2002, 192: 289—306[DOI]
- 33 Zhang Z M, Xiao Y L, Xu Z Q, et al. UHP metamorphic rocks from the Chinese continental scientific drilling project: I. Petrology and geochemistry of the main hole (0—2050 m). *Contrib Mineral Petrol*, 2006, 152: 421—441[DOI]
- 34 章军锋, 金振民, Green H W, 等. 大陆深俯冲带中的水: 来自大别山超高压榴辉岩的证据. *科学通报*, 2000, 45: 1889—1894
- 35 Katayama I, Nakashima S, Yurimoto H. Water content in natural eclogite and implication for water transport into the deep upper mantle. *Lithos*, 2006, 86: 245—259[DOI]
- 36 Chen R X, Zheng Y F, Gong B, et al. Origin of retrograde fluid in ultrahigh-pressure metamorphic rocks: Constraints from mineral hydrogen isotope and water content changes in eclogite-gneiss transitions in the Sulu orogen. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 2299—2325[DOI]
- 37 Zhang Z M, Shen K, Xiao Y L, et al. Mineral and fluid inclusions in zircon of UHP metamorphic rocks from the CCSD-main drill hole: A record of metamorphism and fluid activity. *Lithos*, 2006, 92: 378—398[DOI]
- 38 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
- 39 Pertermann M, Hirschmann M M. Anhydrous partial melting experiments on MORB-like eclogite: Phase relations, phase compositions and mineral-melt partitioning of major elements at 2—3 GPa. *J Petrol*, 2003, 44: 2173—2201[DOI]
- 40 Klemme S, Blundy J D, Wood B J. Experiment constraints on major and trace partitioning during partial melting of eclogite. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66: 3109—3123[DOI]
- 41 Yao Y P, Ye K, Liu J, et al. A transitional eclogite- to high pressure granulite-facies overprint on coesite-eclogite at Taohang in the Sulu ultrahigh-pressure terrane, Eastern China. *Lithos*, 2000, 52: 109—120[DOI]
- 42 Liu J B, Ye K, Sun M. Exhumation *P-T* path of UHP eclogites in the Hong'an area, western Dabie Mountains, China. *Lithos*, 2006, 89: 154—173[DOI]
- 43 Perchuk L L, Safonov O G, Yapaskurt V O, et al. Crystal-melt equilibria involving potassium-bearing clinopyroxene as indicator of mantle-derived ultrahigh-potassic liquids: An analytical review. *Lithos*, 2002, 60: 89—111[DOI]
- 44 Schmadicke E, Muller W F. Unusual exsolution phenomena in omphacite and partial replacement of phengite by phlogopite+kyanite in an eclogite from the Erzgebirge. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 139: 629—642[DOI]
- 45 Malaspina N, Hermann J, Scambelluri M. Multistage metasomatism in ultrahigh-pressure mafic rocks from the North Dabie Complex (China). *Lithos*, 2006, 90: 19—42[DOI]
- 46 魏春景, 张景森. 固相线以下变质过程中水的行为. *高校地质学报*, 2007, 13: 507—514
- 47 Zack T, Rivers T, Foley S F. Cs-Rb-Ba systematics in phengite and amphibole: An assessment of fluid mobility at 2.0 GPa in eclogites from Trescolmen, Central Alps. *Contrib Mineral Petrol*, 2001, 140: 651—669
- 48 金振民, Green H W, Zhou Y, 等. 熔融流体与上地幔流变强度关系的实验研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1997, 27: 401—406
- 49 何文渊, 李江海, 钱祥麟. 部分熔融状态下岩石的流变行为及变形机制. *地质科技情报*, 1998, 17: 39—44
- 50 Ernst W G. Preservation/exhumation of ultrahigh-pressure subduction complexes. *Lithos*, 2006, 92: 321—335[DOI]