

文章编号: 1673- 9469(2011) 02- 0040- 07

西大别石榴黑云斜长片麻岩中金红石的退变质演化

张景森^{1,2}, 张静³, 张红芬^{1,2}, 周俊杰^{1,2}

(1. 河北工程大学 资源学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省资源勘测研究实验室, 河北 邯郸 056038; 3. 河北工程大学 图书馆, 河北 邯郸 056038)

摘要:以取自大别山西段七里坪的石榴黑云斜长片麻岩为例, 使用矿物热力学数据库和 THERMOCALC 程序(3.33 版), 计算了 0.3~ 1.5 GPa 和 450~ 650°C 条件下的 $P-T$ 视剖面相图, 讨论了该类岩石中金红石、钛铁矿与榭石矿物稳定的 $P-T$ 条件, 分析了该岩石从高压条件近等温降压过程中金红石的退变质作用。研究表明, 金红石具有较高的稳定压力, 一般大于 0.75 GPa, 压力低时稳定范围仅局限于较低温的小区域内; 榭石具有小于 565°C 的较低温度和 0.35~ 1.40 GPa 的压力范围, 榭石可与金红石共生, 但其 $P-T$ 条件处于榭石稳定域边缘较狭窄的范围内; 在温度大于 475°C、压力低于 0.75 GPa 的区域, 金红石可与钛铁矿共生, 钛铁矿则稳定于温度大于 570°C、压力低于 0.55 GPa 的范围。根据金红石向钛铁矿的转变及体系含水量, 约束该片麻岩角闪岩相退变质 $P-T$ 条件为压力 0.55~ 0.75 GPa 且温度大于 570°C。

关键词: 金红石; 钛铁矿; 榭石; 石榴黑云斜长片麻岩; 高压变质; 退变质; 大别山

中图分类号: P578.4+ 7; P581; P588.34+ 5

文献标识码: A

Retrograde metamorphism of rutile in garnet– biotite– plagioclase gneiss from the western Dabie Mountain

ZHANG Jing-sen^{1,2}, ZHANG Jing³, ZHANG Hong-fen^{1,2}, ZHOU Jun-jie^{1,2}

(1. School of Resource Sciences, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Key Laboratory of Resource Survey and Research of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 3. Library, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

Abstract: With the example of garnet– biotite– plagioclase– gneiss from Qiliping, western Dabie Mountain, the $P-T$ pseudosections were calculated in range of 0.3~ 1.5 GPa and 450~ 650°C by using the latest thermodynamic data set and the software THERMOCALC version 3.33. The stability of rutile, ilmenite and sphene in such gneiss were discussed, and the retrograde metamorphism from high– pressure of rutile in this sample was analysed. The results show that rutile is generally stable in higher pressure than 0.75 GPa, and in lower pressure within a narrow temperature range; sphene is stable in conditions of 0.35~ 1.40 GPa and lower than 565°C, and the coexistence of sphene with rutile is stable in a narrow angular range around the sphene stable domain; the rutile can be stable with ilmenite together in a large $P-T$ range of more than 475°C in temperature and less than 0.75 GPa in pressure, but the ilmenite is only stable in domain of more than 570°C in temperature and less than 0.55 GPa in pressure. The transformation of rutile into ilmenite in this gneiss and the water content in the rock system may constrain the retrograde metamorphic condition in amphibolite facies as 0.55~ 0.75 GPa in pressure and more than 570°C in temperature.

Key words: rutile; ilmenite; sphene; retrograde metamorphism; garnet– biotite– plagioclase– gneiss; western Dabie Mountain

收稿日期: 2011- 04- 11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872056) 特约专稿

作者简介: 张景森(1966-), 男, 山东泗水人, 博士, 副教授, 从事岩石学、矿床学、地质资源与地质工程等领域的研究。

金红石是一种在许多类型的岩石(如高级变质岩、岩浆岩、沉积岩及热液矿床)中都很常见的副矿物。在高压-超高压变质岩中,金红石不但可以形成重要的矿床^[1-2],而且可以为研究俯冲带变质作用提供非常丰富而重要的信息^[3-5]。因此,地质学家普遍十分注重对金红石的研究。有关高压-超高压变质岩石中的金红石研究涉及矿物学^[3-6]、地球化学^[6-12]、地质年代学^[13-15]、成矿作用^[16-19]和变质作用^[20-23]等众多方面。由于高压-超高压岩石折返至地表时普遍发生退变质作用,其中的金红石也会退变形成钛铁矿、榍石等含钛矿物。在研究高压-超高压变质岩中的金红石时,都不可避免地要讨论到金红石的退变质问题^[6]。但系统讨论金红石变质问题的专门研究甚少,相关文献见于对金红石矿床变质条件的研究^[20],或对少数钛矿物相的关系分析^[22-23]。因此,迄今对这种转变关系发生的条件仍然没有一个较为完整的认识。相平衡方法使用矿物热力学数据库计算 $P-T$ 视剖面相图,可以为分析岩石的变质作用提供最多的有用信息^[24-25],是该研究领域的重要发展方向,可以解决许多复杂的岩石学问题^[24-27]。本文研究的目的是通过对西大别七里坪的石榴黑云斜长片麻岩进行相图计算,探讨金红石与榍石、钛铁矿在该类片麻岩中的稳定条件及其发生退变质作用时含钛矿物的转变关系。

1 地质背景

大别山西段是指位于河南省新县和湖北省红安县境内,东侧由商麻断裂与大别山东段相隔,西侧由大悟断裂与桐柏山地区分开的地块。这一地区以新县高压-超高压变质地体为核心呈构造穹隆,南北两翼由高压至中低压变质带组成^[28-33]。岩石构造单元从北到南可以划分为5个部分:南湾变质复理石单元、八里畈构造混杂岩单元、浒湾-红安高压榴辉岩单元、新县高压-超高压榴辉岩单元和木兰山蓝片岩-绿片岩单元。各单元之间大多由碰撞造山后伸展作用形成的多层拆离带所分隔^[30-33]。其中新县高压-超高压榴辉岩单元主要由花岗质到花岗闪长质片麻岩和少量的副片麻岩和白云母片岩等组成,富含榴辉岩透镜体或布丁块体,榴辉岩块体与围岩成渐变接触关系。红安高压榴辉岩单元主要岩石类型为片麻岩类,具有片岩夹层、浅粒岩和花岗岩等。所研究的样

品采自于红安高压单元内,地点位于七里坪镇东南侧的石灰山采石场,这里主要岩石类型为浅色的白云钠长片麻岩和大理岩(大理岩已开采殆尽),石榴黑云斜长片麻岩呈夹层状或透镜状产于浅色片麻岩中,色较深,是较为富铁镁成分的片麻岩,但相对于榴辉岩则明显偏中酸性,其原岩可能是中酸性的侵入岩或火山岩。

2 岩相学与矿物学特征

石榴黑云斜长片麻岩呈灰黑色、深灰色,中-细粒斑状变晶结构,片麻状构造,主要组成矿物为石榴子石、黑云母、石英、斜长石,其次有白云母、绿泥石、绿帘石、角闪石、钛铁矿、金红石,还可见少量的电气石。该样品中未见榍石。

石榴子石自形晶,粒径1~2mm,退变边不明显,包裹体矿物主要是石英,其次为绿帘石,再次为金红石、少量的锆石和钛铁矿。其成分以铁铝榴石为主(50%~70%),其次为钙铝榴石(20%~30%)、镁铝榴石(8%~16%)和锰铝榴石(<10%),钙铁榴石很少(<2%)。石榴子石从核部到边缘具有明显的成分环带,表现为铁铝榴石和锰铝榴石成分略减少、镁铝榴石增加,具有明显的生长环带特征;但在边缘铁铝榴石、钙铝榴石和镁铝榴石均减少而锰铝榴石明显增加,明显具有受到后期退变质改造的特征。

黑云母呈长条状,宽小于0.1mm,长可达1mm,成分上较为富镁,Fe/(Fe+Mg)比值0.4左右,并含有少量的钛,不含 Fe^{3+} 。石英呈不等粒结构,粒径最大可达1mm,小者小于0.1mm,存在于石榴子石斑晶和基质中。斜长石粒径小于0.8mm,成分中一般含钙长石24%~27%,少部分颗粒为钠长石。

白云母属于多硅型,一般有两种,一种硅含量较高, $Si=3.46$;另一种硅含量稍低, $Si=3.22$ 。绿泥石局部聚集,颗粒较大,粒径可达0.3mm。绿帘石主要分散在基质中,粒径较大,可达0.2mm;石榴子石中的绿帘石包裹体颗粒细小,呈长条形,长度小于0.1mm,宽度为其0.1~0.5倍不等。角闪石在薄片只在局部分布,粒径小于0.2mm。电气石为镁质电气石,含量很少,仅见到少数几个矿物颗粒。

金红石呈粒状,主要存在于基质中,也在石榴子石中呈包裹体存在。基质中的金红石普遍具有

钛铁矿退变边。钛铁矿主要在基质中作为金红石的退变边,石榴子石中只在一些包裹体矿物周围少量出现。但金红石常常与钛铁矿交互生长,在电子显微图像中可见到金红石颗粒中存在少量的钛铁矿,而钛铁矿颗粒中也含有金红石条纹。

根据该片麻岩的矿物组成及其特征,岩石至少经历了高压变质作用和后期角闪岩相退变质作用2个变质阶段。

3 金红石退变质的相平衡模拟

3.1 相图计算条件

相平衡模拟以 $MnNCKFMASHTO$ (即 $MnO - Na_2O - CaO - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O - TiO_2 - O$, O 即指 Fe_2O_3) 体系下的 $P-T$ 视剖面图计算为主。考虑成分-活度模型的矿物有石榴子石^[34]、绿辉石^[35]、蓝闪石和普通角闪石^[36]、黑云母^[34]、白云母和钠云母^[37]、斜长石^[38]、绿泥石^[39, 40],其它矿物如硬柱石、钛铁矿、磁铁矿、金红石、榍石、石英均为纯端元矿物,流体相为纯水(H_2O)。

相平衡计算有效全岩成分根据组成矿物的含量及其成分计算产生。由于石榴子石具有明显成分环带,只取其一半的体积和边部成分参与岩石成分的计算。该岩石成分以氧化物摩尔百分数(mol%)表示为 $SiO_2 = 64.03$, $TiO_2 = 3.06$, $Al_2O_3 = 10.81$, $FeO = 7.27$, $MgO = 5.38$, $MnO = 0.11$, $CaO = 4.22$, $Na_2O = 3.59$, $K_2O = 1.44$, $O = 0.08$; 体系饱和水含量 $H_2O = 4.75$ (用 H_2O 与其它氧化物总和的摩尔百分数表示)是岩石中现有矿物组合结合的含水量。

相图计算的 $P-T$ 范围为 $0.3 \sim 1.5$ GPa 和 $450 \sim 650$ °C。计算时使用了 THERMOCALC 软件(版本 3.33, 2009 更新)^[41-42] 和热力学数据库(2003 更新文件 $tc-ds55.txt$)^[43]。计算时设石英和水过剩。所计算的相图如图 1 所示。

3.2 金红石、钛铁矿和榍石的稳定范围

所计算的 $P-T$ 视剖面图(图 1)显示了不同矿物组合的稳定范围。图中有几个典型的矿物组合具有较大的稳定范围,在图上占据较大面积,如图左上部的石榴子石+蓝闪石+白云母+钠云母+绿帘石+绿泥石+榍石组合(I; 石英过量,存在于各组合中,故略)、图顶部的石榴子石+绿辉石

+蓝闪石+白云母+钠云母+金红石组合(II)、图右上部的石榴子石+黑云母+白云母+斜长石+角闪石+金红石组合(III)以及图下部中间的石榴子石+黑云母+白云母+斜长石+绿泥石+金红石+钛铁矿+磁铁矿组合(IV)等(图 1)。这里主要分析含钛矿物金红石、钛铁矿和榍石的矿物组合及其稳定条件。

在图 1 中,只含金红石的矿物组合具有较高的压力,当温度低于 565 °C 时,金红石稳定的压力下限约 $1.15 \sim 1.40$ GPa,温度高于 565 °C 时压力高于 0.75 GPa。典型矿物组合如上述组合 II 和 III 等(图 1)。

含榍石的矿物组合具有较低的温度条件,压力为 1.15 GPa 时温度可高达 565 °C; 压力升高或降低时,含榍石组合的稳定温度都降低,一般低于 550 °C; 但榍石最高稳定压力约为 1.40 GPa。典型矿物组合是上述组合 I(图 1)。同时含有榍石与金红石的矿物组合稳定范围较小,分布于含榍石矿物组合稳定域边缘,相当于含榍石组合域较狭窄的一个镶边(图 1)。

含钛铁矿的矿物组合占据了图 1 中压力低于 0.75 GPa 以下的大部分区域,且随着压力下降稳定的温度范围趋于降低,可以低至 475 °C。该 $P-T$ 范围内矿物组合主要是钛铁矿与金红石共存的组合,典型组合如上述组合 IV(图 1)。只含钛铁矿的组合稳定于 570 °C 以上和 0.55 GPa 以下的区域,典型组合为石榴子石+黑云母+斜长石+钛铁矿+角闪石(图 1 右下组合 V)。

在压力低于 0.75 GPa 时,相对低温的含榍石组合升温时,榍石消失出现含金红石组合,其后继续升温时方出现金红石和钛铁矿组合,这中间存在一个较狭窄的榍石与钛铁矿不能共生的间隙。这可能是受岩石化学成分控制的。

另外,黑云母也是可容纳钛元素的含钛矿物,但一般含钛数量较小。黑云母在 450 °C 时稳定压力低于 0.9 GPa,温度在 650 °C 时稳定压力高达约 1.5 GPa,其间随温度升高而稳定压力也升高。黑云母可以与其它钛矿物共生。

3.3 金红石退变质演化

金红石的退变质作用是与其寄主片麻岩的退变质作用紧密相关。该片麻岩中多硅白云母的存在表明其经历了高压变质过程。该取样点北侧约 1.5 km 处的榴辉岩具有 $2.4 \sim 2.6$ GPa 和 $570 \sim 585$ °C

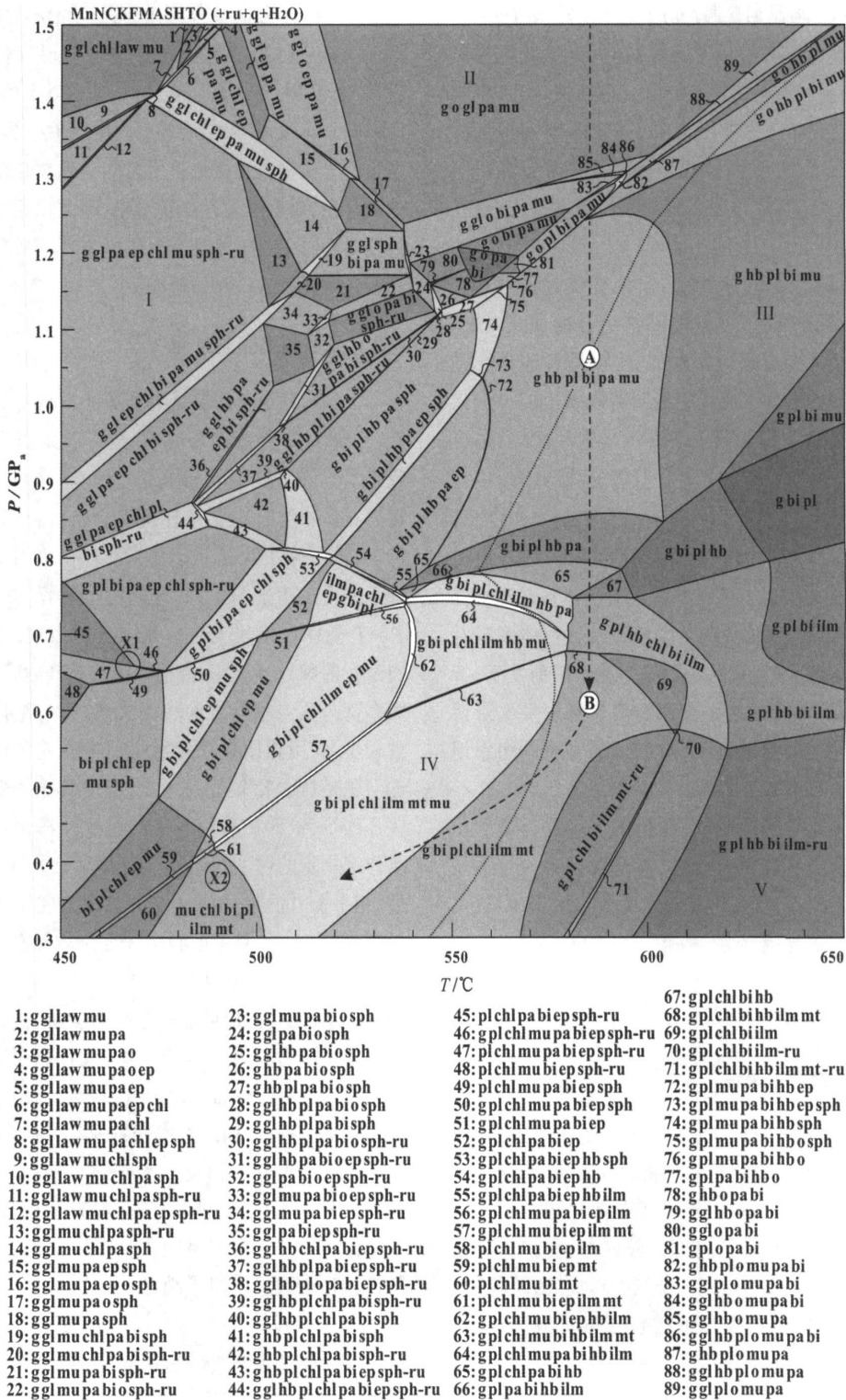


图 1 石榴黑云斜长片麻岩 P-T 视剖面图

Fig. 1 P-T pseudosection diagram calculated for the garnet-biotite-plagioclase-gneiss

注: MnNCKFMASHTO (+ru+q+H₂O) 表示化学体系, 其中括号内符号表示金红石、石英和水过剩, 即存在于所有组合中; 部分组合中不含金红石时用-ru表示。图中灰色区块表示矿物组合稳定的范围, 色调由浅到深表示矿物组合的变度由 2 到 7 变化。I-V 表示矿物组合代号 (见正文说明)。X1 和 X2 分别表示某矿床中榍石、金红石的最佳成矿条件^[20]。点线表示体系现有含水量等值线(H₂O=4.75 mol%), 断线表示高压岩石近等温降压的退变质 P-T 轨迹(585°C)^[44]。矿物代号: bi, 黑云母 (biotite); chl, 绿泥石 (chlorite); ep, 绿帘石 (epidote); g, 石榴子石 (garnet); gl, 蓝闪石 (glaucophane); hb, 普通角闪石 (hornblende); ilm, 钛铁矿 (ilmenite); law, 硬柱石 (lawsonite); mt, 磁铁矿 (magnetite); mu, 白云母 (muscovite); o, 绿辉石 (omphacite); pa, 钠云母 (paragonite); pl, 斜长石 (plagioclase); q, 石英 (quartz); ru, 金红石 (rutile); sph, 榍石 (sphene)。

的峰期变质 $P-T$ 条件^[44]。一般认为,该地区高压榴辉岩退变质早期普遍经历了近等温降压的过程。

假设该片麻岩从变质峰期的 585℃ 发生等温降压,则金红石沿此退变质 $P-T$ 轨迹(图 1 中曲线 AB)演化。首先降压至约 1.25GPa 时出现黑云母+金红石的组合,降压至 0.75GPa 时金红石向钛铁矿转变,其后可能出现明显的降温过程,金红石与钛铁矿稳定共生。

实际上,流体(水)在岩石的变质过程中具有十分重要的作用,控制着矿物组合的演化^[45,46]。流体不但是变质反应发生的介质,而且还是一些含水矿物的重要组成。它控制着脱水反应与水化反应发生的方向。图 1 中所示水饱和曲线,是岩石现有矿物所固有的水含量等值线(即 $H_2O=4.75\text{ mol}\%$),曲线左侧矿物组合需要更多的水,右侧只需要较少的水。如果不考虑水的进出,岩石退变质轨迹上 A 点以上要求水含量大于体系现有水含量,退变质作用不容易发生;A 点以下,体系现有水含量略微过剩,利于岩石退变质作用的发生,特别是 A、B 两点之间是有利于该片麻岩发生所谓的“再平衡”的温压范围(图 1)。这种再平衡作用形成了岩石中常见的黑云母+斜长石组合。B 点以后进入显著降温阶段,在相图上表现为退变质轨迹进入高水含量组合域,体系现有水含量不足造成体系缺乏流体,后续的退变质作用不易发生,B 点处的矿物组合得以保留。

4 讨论

4.1 钛矿物稳定条件

金红石通常被认为是高压和超高压条件(榴辉岩相)下的标志性矿物。相图计算表明,除了榴辉岩相,金红石也可以稳定于角闪岩相较高压力条件。相图计算的结果可以较好的说明“为什么高-超高压变质作用利于金红石形成”的问题^[21]。压力较低时,如果条件适当也可以形成金红石。如对北秦岭八庙-青山黑云角闪片岩中金红石矿床的变质条件研究认为,金红石成矿具有最佳温压条件 490℃ 和 0.38GPa,而榴石和钛铁矿最佳成矿条件分别为 467℃ 和 0.66GPa 以及 566℃ 和 0.20GPa^[20]。这些矿物成矿条件基本上符合或接近本文相图模拟的榴石、金红石和钛铁矿稳定的温压范围(图 1)。但从模拟结果来看,三种钛矿物分别成矿应该具有更宽的温压范围。

在高压-超高压变质岩中,也发现有榴石产出,一般认为这些榴石在成分上属于高铝榴石^[22-23,47]。但在超高压岩石中也发现有低铝榴石^[48],但其榴石成分仍然含有 2 wt% 以上的铝,应该不同于本文的纯端元榴石。Ren (2008) 讨论了角闪岩中榴石和磁铁矿常常作为钛铁矿的反应边而存在,榴石也含有少量的铝,并且水活度和氧活度对榴石的稳定性具有重要影响^[22]。关于高铝榴石还需要做进一步的研究。

4.2 片麻岩的退变质条件

大别山高压-超高压变质带中广泛分布的片麻岩,绝大多数也经历了高压或超高压变质过程^[49-51]。由于角闪岩相退变质影响,这些片麻岩类岩石矿物组合主要呈现角闪岩相组合,如黑云母、斜长石等。但由于岩石并没有在角闪岩相条件下完全达到平衡状态,这就使得估算其退变质 $P-T$ 条件误差较大^[52]。相图分析表明,无论是斜长石的牌号,还是石榴子石中的铁镁含量,它们大多都与压力呈显著的相关关系,而与温度相关性较小,利用相图估计片麻岩的退变质条件存在的问题是压力比较容易确定,温度较难确定。有关金红石、钛铁矿和榴石等的温度计适用性还需要作进一步的讨论^[23]。由于岩石退变质的不平衡性,相平衡方法估计的 $P-T$ 条件与实际条件差异很难估计。如果考虑到金红石作为片麻岩中的副矿物,它向钛铁矿的转变对其它主要矿物成分影响较小,则它们最可能接近平衡状态,由此可以对退变质压力约束至 0.55~0.75GPa。该压力要低于由斜长石牌号和石榴子石边缘成分约束的压力 1.0GPa 左右。同时考虑体系现有流体含量,大致可约束其退变质温度应大于 570℃。该 $P-T$ 相当于图 1 中 B 点附近。不过,从矿物组合来看,本例样品中并未见到磁铁矿,这很可能是由于相图计算时钛铁矿使用了纯端元矿物的结果,因为实际金红石和钛铁矿中都可以容纳一定数量的 Fe_2O_3 成分^[22,34,53-54]。实际上,使用相图分析变质岩石的 $P-T$ 条件还应考虑全岩化学成分、选用的矿物固溶体模型、流体活度等多种因素的影响,有关问题还有待进一步探讨。

5 结论

石榴黑云斜长片麻岩中含钛矿物主要是金红

石、钛铁矿和榍石。初步研究表明, 金红石大多稳定于压力大于 0.75GPa 的相对高压条件下, 温度低时压力较高、温度高时压力较低, 但压力低于 0.75GPa 时也可在很窄的温度范围内稳定; 榍石稳定的温度一般小于 565°C, 压力范围 0.35~1.40GPa; 榍石与金红石共生区域较窄; 金红石与钛铁矿共生区域较大, 压力低于 0.75GPa, 温度高于 475°C, 但温度高于 570°C 时压力范围变小; 只有钛铁矿时, 其稳定温度高于 570°C, 压力低于 0.55GPa。

西大别七里坪的石榴黑云斜长片麻岩从高压变质条件近等温降压时, 其角闪岩相变质 $P-T$ 条件, 根据金红石退变质形成钛铁矿估计压力为 0.55~0.75GPa, 根据饱和和流体含量估计温度大于 570°C。

致谢: 核工业北京地质研究院分析测试实验室的于阿朋工程师对样品电子探针分析工作给予了极大的帮助, 在此谨表示诚挚的谢意。

参考文献:

- [1] 赵一鸣. 金红石矿床的类型、分布及其主要地质特征[J]. 矿床地质, 2008, 27(4): 520-530.
- [2] 赵一鸣, 李大新, 韩景仪, 等. 内蒙古羊蹄子山-磨石山钛矿床锐钛矿、金红石和钛铁矿的矿物学特征[J]. 矿床地质, 2008, 27(4): 466-473.
- [3] 宋衍茹, 金振民. 纳米级超高压相金红石-大陆深俯冲深度的示踪[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 267-272.
- [4] YANG J S, BAI W J, FANG Q S, et al. Silicon-rutile - an ultra-high pressure (UHP) mineral from an ophiolite [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(7): 528-531.
- [5] 陈振宇, 王登红, 陈毓川, 等. 榴辉岩中金红石的矿物地球化学研究及其意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2006, 31(4): 533-538, 550.
- [6] 王硕, 王汝成, 邱检生, 等. CCSD 主孔超高压榴辉岩金红石中的矿物包裹体研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(1): 61-70.
- [7] ZACK T, KRONZ A, FOLEY S, et al. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists [J]. Chemical Geology, 2002, 184: 97-122.
- [8] ZACK T, VON EYNAT TEN H, KRONZ A. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies [J]. Sedimentary Geology, 2004, 171: 37-58.
- [9] 王汝成, 王硕, 邱检生, 等. CCSD 主孔揭示的东海超高压榴辉岩中的金红石: 微量元素地球化学及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(2): 465-474.
- [10] 余金杰, 徐珏, 陈振宇, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩中金红石微量元素地球化学特征[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 1835-1841.
- [11] 高长贵, 刘勇胜, 宗克清, 等. 超高压榴辉岩金红石中高场强元素变化的控制因素及其地球动力学意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2008, 33(4): 487-503.
- [12] 陈振宇, 曾令森, 李晓峰, 等. CCSD 主孔榴辉岩中金红石微量元素特征: LA-ICPMS 分析及其意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(7): 1645-1657.
- [13] 李秋立, 李曙光, 周红英, 等. 超高压榴辉岩中金红石 U-Pb 年龄: 快速冷却的证据[J]. 科学通报, 2001, 46(19): 1655-1658.
- [14] LI Q L, LI S G, ZHENG Y F, et al. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China: A new constraint on the cooling history [J]. Chemical Geology, 2003, 200: 255-265.
- [15] MATHIEU C, OPREILLY S Y, GRIFFIN W L, et al. Hf isotopes of MARID (mica-amphibole-rutile-ilmenite-diopside) rutile trace metasomatic processes in the lithospheric mantle [J]. Geology, 2005, 33: 45-48.
- [16] 杜建国, 孙先如, 胡礼军. 大别造山带超高压变质带中含金钛-铁氧化物[J]. 安徽地质, 1999, 9(4): 280-283.
- [17] 徐珏, 陈毓川, 王登红, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 米超高压变质岩中的钛矿化[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 119-126.
- [18] 王汝成, 邱检生, 倪培, 等. 苏鲁超高压榴辉岩中的钛成矿作用: 大陆板块汇聚边界的成矿作用[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 1827-1834.
- [19] 徐珏, 王登红, 陈毓川, 等. 中国大陆科学钻探主孔超高压变质岩中钛的矿化作用[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 612-624.
- [20] 徐少康, 李博昀, 程建祖, 等. 八庙-青山金红石矿床变质条件与成矿的关系研究[J]. 化工矿产地质, 1997, 19(2): 93-98.
- [21] 徐少康, 周希贤, 郝国庆. 金红石高-超高压变质成矿作用的几个问题[J]. 化工矿产地质, 2005, 27(1): 6-14, 20.
- [22] REN M. Titanite-ilmenite-magnetite phase relations in amphibolites of the Chynov area (Bohemian Massif, Czech Republic) [J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2008, 15(3): 239-246.
- [23] TROPPEL P, MANNING C E. The current status of titanite-rutile thermobarometry in ultrahigh-pressure metamorphic rocks: The influence of titanite activity models on phase equilibrium calculations [J]. Chemical Geology, 2008, 254: 123-132.
- [24] 魏春景, 周喜文. 变质相平衡的研究进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 341-351.
- [25] 魏春景, 苏香丽, 姜玉行, 等. 榴辉岩中传统地质温压计新解: 来自 PT 视剖面图的证据[J]. 岩石学报,

- 2009, 25 (9): 2078– 2088.
- [26] 张景森, 张静, 周俊杰. 矽卡岩和矽卡岩型矿床研究方法[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2009, 26 (1): 85– 89.
- [27] 张红芬, 闫纲丽, 张景森. 榴辉岩变质演化 $P-T$ 轨迹研究的新进展[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2011, 28 (2): 85– 90.
- [28] HACKER B R, RATSCHBACHER L, WEBB L E, et al. Zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh- pressure Qinling- Dabie orogen, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 161: 215– 230.
- [29] HACKER B R, RATSCHBACHER L, WEBB L E, et al. Exhumation of ultrahigh- pressure continental crust in east central China: Late Triassic- Early Jurassic tectonic unroofing [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 13 339– 13 364.
- [30] ZHONG Z Q, SUO S T, YOU Z D. Regional- scale extensional tectonic pattern of ultrahigh- P and high- P metamorphic belts from the Dabie massif, China [J]. International Geology Review, 1999, 41: 1 033– 1 041.
- [31] ZHONG Z Q, SUO S T and YOU Z D, et al. Major constituents of the Dabie collisional orogenic belt and partial melting in the ultrahigh- pressure unit [J]. International Geology Review, 2001, 43: 226– 236.
- [32] 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 大别山造山带的构造几何学和运动学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.
- [33] LIU X C, WEI C J, LIS Z, et al. Thermobaric structure of a traverse across the western Dabieshan: implications for collisional tectonics of the Sino- Korean and Yangtze cratons [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2004, 22 (3): 361– 379.
- [34] WHITE R W, POMROY N E and POWELL R. An in- situ metatexite- diatexite transition in upper amphibolite facies rocks from Broken Hill, Australia [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2005, 23: 579– 602.
- [35] GREEN E C R, HOLLAND T J B, POWELL R. An order- disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite- diopside- hedenbergite- aegirine, with applications to eclogite rocks [J]. American Mineralogist, 2007, 92: 1181– 1189.
- [36] DIENER J F A, POWELL R, WHITE R W, et al. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in $\text{Na}_2\text{O}- \text{CaO}- \text{FeO}- \text{MgO}- \text{Al}_2\text{O}_3- \text{SiO}_2- \text{H}_2\text{O}- \text{O}$ [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25: 631– 656.
- [37] COGGON R and HOLLAND T J B. Mixing properties of phengitic micas and revised garnet- phengite thermobarometers [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2002, 20: 683– 696.
- [38] HOLLAND T J B, POWELL R. Activity- composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145: 492– 501.
- [39] HOLLAND T J B, BAKER J M, POWELL R. Mixing properties and activity- composition relationships of chlorites in the system $\text{MgO}- \text{FeO}- \text{Al}_2\text{O}_3- \text{SiO}_2- \text{H}_2\text{O}$ [J]. European Journal of Mineralogy, 1998, 10: 395– 406.
- [40] MAHAR E M, BAKER J M, POWELL R, et al. The effect of Mn on mineral stability in metapelites [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1997, 15: 223– 238.
- [41] POWELL R, HOLLAND T J B. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program [J]. Journal of metamorphic Geology, 1988, 6: 173– 204.
- [42] POWELL R, HOLLAND T J B, WORLEY B. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non- linear equations, with examples using themocalc [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1998, 16: 577– 588.
- [43] HOLLAND T J B, POWELL R. An internally consistent thermodynamic data set for phase of petrological interest [J]. Journal of Metamorphic Geology. 1998, 16: 309– 343.
- [44] 娄玉行, 魏春景, 初航, 等. 西大别造山带红安高压榴辉岩的变质演化: 岩相学与 $\text{Na}_2\text{O}- \text{CaO}- \text{K}_2\text{O}- \text{FeO}- \text{MgO}- \text{Al}_2\text{O}_3- \text{SiO}_2- \text{H}_2\text{O}- \text{O}$ (Fe_2O_3) 体系中相平衡关系[J]. 岩石学报, 2009, 25 (1): 124– 138.
- [45] GUIRAUD M, POWELL R, REBAY G. H_2O in metamorphism and unexpected behaviour in the preservation of metamorphic mineral assemblages [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2001, 19 (4): 445– 454.
- [46] 魏春景, 张景森. 固相线以下变质过程中水的行为[J]. 高校地质学报, 2007, 13 (3): 507– 514.
- [47] 叶凯, 叶大年. 高铝榴石中 $\text{P}+ \text{Mg}+ \text{F} = \text{Si}+ \text{Al}+ \text{OH}$ 特殊替代的高压效应[J]. 科学通报, 1996, 41 (9): 811– 814.
- [48] YE K, LIU J B, CONG B L, et al. Ultrahigh- pressure (UHP) low- Al titanites from carbonate- bearing rocks in Dabieshan- Sulu UHP terrane, eastern China [J]. American Mineralogist, 2002, 87: 875– 881.
- [49] LIU J B, YE K, MARUYAMA 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.
- [50] LIU F L, XU Z Q, KATAYAMA I, et al. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre- pilot drillhole CCSD- PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. Lithos, 2001, 59: 199– 215.

65.

- [10] 张胜, 袁慧, 蒋晓昊. 膜生物反应器处理含盐生活污水的研究[J]. 河北工程大学(自然科学版), 2009, 26(4): 32-35.
- [11] 范茂军, 高乃云, 黄鑫, 等. PAC/超滤组合工艺处理常规工艺出水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(17): 84-86.
- [12] 董秉直, 曹达文, 范瑾初. 粉末活性炭-超滤膜处理

黄浦江原水的研究[J]. 上海环境科学, 2003, 22(11): 731-737.

- [13] 李永红, 张伟, 张晓健, 等. 超滤膜的污染控制研究进展[J]. 中国给水排水, 2009, 25(2): 1-4.
- [14] 王旭东, 梁玉龙, 王磊, 等. 超滤膜净化有机废水及在线水力清洗对膜污染的影响[J]. 工业水处理, 2010, 30(3): 48-50.

(责任编辑 马立)

(上接第39页)制作粉煤灰双免空心砖,采用规格390mm×190mm×190mm,空洞率可以达到15%以上,这样可以大大节约成本,更有利于提高生产效率。

4 结论

1) 用正交试验法对试验方案进行设计优化,试验效率高,减少了人力和材料的浪费,而且最大限度地排除了其它因素的干扰,剪剪性强。能有效地进行比较,做出调整,使粉煤灰双免砖配比设计更加合理。

2) 以粉煤灰为主要原料,通过掺加适量的水泥、砂子、白灰和一定的外加剂,经常温常压养护28d后,抗折强度可达到5.28 MPa,抗压强度达到27.49 MPa,制成空心砖空洞率可达到15%以上。

参考文献:

- [1] 柯国军, 杨晓峰, 彭红, 等. 化学激发粉煤灰活性机理

研究进展[J]. 煤炭学报, 2005(3): 365-370.

- [2] 董发勤, 万朴, 潘兆槽, 等. 纤维水镁石应用矿物学研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1997.
- [3] 张云升, 孙伟, 沙建芳, 等. 粉煤灰地聚合物混凝土的制备及其特性[J]. 混凝土与水泥制品, 2003(2): 13-15.
- [4] 苏玉柱, 杨静, 马鸿文, 等. 利用粉煤灰制备高强矿物聚合材料的实验研究[J]. 现代地质, 2006, 20(2): 359.
- [5] 翁履谦, 宋申华. 新型地质聚合物凝胶材料[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 67.
- [6] KHATE D, CHAUDHARY R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review[J]. Mater Sci, 2007(42): 729-746.
- [7] 井巍, 刘剑虹, 林枫. 粉煤灰地质聚合物的制备研究[J]. 高师理科学刊, 2006, 26(4): 40-42.
- [8] 苏玉柱, 杨静, 马鸿文, 等. 利用粉煤灰制备高强矿物聚合材料的实验研究[J]. 现代地质, 2006, 20(2): 359.

(责任编辑 刘存英)

(上接46页)

- [51] LIU F L, ZHANG Z M, KATAYAMA I, et al. Ultrahigh-pressure metamorphic records hidden in zircons from amphibolites in Sulu terrane, eastern China [J]. The Island Arc, 2003, 12: 256-267.
- [52] CHU HANG, WEI CHUNJING, SU SHANGGUO. Phase equilibria of HP-UHP mica-schists in Jiangling, eastern Dabieshan orogen [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19: 973-982.

- [53] WHITE R W, POWELL R, HOLLAND T J B, et al. The effect of TiO₂ and Fe₂O₃ on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃ [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 497-511.

- [54] 张惠芬, 蔡秀成. 金红石中铁的存在形式的研究[J]. 矿物学报, 1988, 8(4): 348-357.

(责任编辑 马立)