

高级变质岩中深熔作用的相平衡研究

魏春景, 王伟

北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871

Wei Chunjing, Wang Wei

The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, China; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Wei Chunjing, Wang Wei. Phase equilibria of anatexis in high-grade metapelites, *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 125-134

Abstract: Anatexis is pervasive in high grade metamorphic rocks and has received much attention from geoscientists. With the progress in the study of phase equilibria since the beginning of the 1990's, melt formation and fractionation and relevant retrograde reactions can be quantitatively studied using the software THERMOCALC and the pseudosection method. There are three main melting regimes in metasedimentary rocks: (1) melting at water-saturated solidus; (2) muscovite dehydration melting; and (3) biotite dehydration melting reactions. Calculation on phase equilibria in the KFMASH and NCKFMASH systems indicates that the phase relations of ferromagnesian minerals are controlled by the KFMASH. But the H_2O -saturated solidus in the KFMASH is 50–60°C higher than the real minimum solidus in metapelites. Thus, the phase relations above the solidus of metapelite can be simulated better with the NCKFMASH. Or with other more multiple component systems. Recent research indicates that the preservation of granulite facies must have accompanied by melt loss. The formation of migmatite includes partial melting, partial segregation and extraction of melt and partial back and retrograde reactions.

Key words: high grade metamorphism; anatexis; THERMOCALC; migmatite

摘要:深熔作用在高级变质岩中非常普遍并受到广泛关注。自20世纪90年代以来,随着变质相平衡研究的突破性发展,利用THERMOCALC程序和视剖面图方法可以定量研究固相线以上的熔体形成、熔体分馏和退变质反应。变质沉积岩中的熔融作用主要有三种机制:饱和水固相线上的熔融、白云母脱水熔融和黑云母脱水熔融。在模拟泥质岩石的KFMASH体系和NCKFMASH体系中的相平衡计算表明,NCKFMASH体系中铁镁矿物的相平衡关系受KFMASH亚体系中矿物相平衡关系的控制,但KFMASH亚体系中固相线位置要比实际的高50~60°C。因此,模拟泥质岩石的固相线以上的相平衡关系最好在NCKFMASH或组分更多的体系中进行。相平衡研究表明麻粒岩相岩石的保存与熔体丢失有关;混合岩的形成过程包括部分熔融作用、不同程度熔体分凝与汲取和不同程度的逆反应和退变反应。

关键词:高级变质;深熔作用;THERMOCALC程序;混合岩

中图分类号:P588.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2007)01-0125-10

0 引言

高级变质岩中发生深熔作用(anatexis)是一个非常普遍的现象。自20世纪初期以来,已有很多学者认为混合岩中的浅色体是由深熔作用形成的^[1-6]。20世纪70年代以来,地质学家们从岩石学^[7-11]、地球化学^[10, 12-14]和实验岩石学^[15-21]等不同角度对变质沉积岩中的深熔作用进行了研究。以此为基础,很多学者建立了变质沉积岩固相线以上的岩石成因格子^[22-28]。

一般认为,在高级变质岩中通过前进变质(深熔)反应形成熔体相,后者具有很强的活动性,它可以在岩石体系中特定部位集中,发生分凝作用(segregation),也可以从体系中分离出去(extraction,汲取),形成岩浆脉体和侵入体,同时,在降温过程中,留在岩石体系中的熔体会发生结晶作用,释放出水流体,引起变质岩石的逆反应(back reaction)和/或退变质反应。因此,高级变质岩石的矿物组合及结构特点取决于不同的进变熔融反应,不同程度的熔体分凝和汲取,以及不同程度的退变反应三种过程的综合效应^[6]。

自20世纪90年代以来,利用内洽性热力学数据^[29]和有关的计算机软件 THERMOCALC,可以定量计算一系列相图^[30]。包括: p - T 投影图、共生图解(compatibility diagram)和 p - T 、 T - X 及 p - X 各种视剖面图(pseudosection)等。借助于这些图解,可以确定变质岩的 p - T 条件、解释各种结构关系等,确定岩石的 p - T 轨迹(详见文献^[31])。利用这种变质相平衡定量研究的理论和方法,White等^[27, 32-33]在深熔过程方面进行了一系列具有开创性的研究工作,从而可以定量讨论在高级变质过程中发生的部分熔融、熔体丢失和结晶作用。本文主要讨论近年来在这一方面的研究成果。

参照 Holland 和 Powell(1998)^[29],文中使用的矿物代号如下:ab,钠长石;als, Al_2SiO_5 ; and,红柱石;bi,黑云母;cd,堇青石;g,石榴石;ky,蓝晶石;ksp,钾长石;liq,熔体;mu,白云母;opx,斜方辉石;pl,斜长石;q,石英;sill,夕线石;sp,尖晶石。

1 变质沉积岩中的深熔反应

Brown(2002)^[34]强调变质沉积岩中的熔融作

用主要有三种机制:饱和水固相线上的熔融、白云母脱水熔融和黑云母脱水熔融。

(1)饱和水固相线熔融反应。在不同模式体系中,饱和水固相线上的熔融反应不同。自然界泥质和长英质岩石的饱和水固相线接近 NKASH (Na_2O - K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O)体系中的固相线(图1),可分为两段,压力高于不变点 I1 的部分为共熔反应[1](eutectic melting reaction),有白云母参与。压力低于不变点 I1 的部分为共熔反应[2],当钠长石和石英存在时,白云母已经消失,白云母不参与熔融反应。因为在典型泥质岩石的蓝晶石和夕线石带中,不出现钾长石,因此泥质岩石中的固相线更可能为转熔反应[3](peritectic reaction)^[26]。Winkler(1979)^[35]把斜长石和石英存在时白云母消失和在片麻岩中出现深熔作用作为高级变质作用的开始标志,大体相当于反应[3]和[4]。在天然岩石中,饱和水固相线熔融反应可以产生不到3%的富水熔体,如此低量熔体难以从结果上确定出来^[27]。

随着岩石中 Na_2O 降低,不变点 I1 沿着不出现钠长石的反应移动到不变点 I2。在不含 Na_2O 的 KASH 体系中,饱和水的固相线要提高 50~100℃。

(2)白云母的脱水熔融作用。在饱和水固相线以上的熔融作用是通过含水矿物的脱水熔融反应(Dehydration-melting reactions, DMRs^[23])发生的,这些反应把水从含水矿物传递到熔体中,并不像固相线以下的变质作用那样形成一个独立的水流体相。在 NKASH 体系中,白云母脱水熔融反应如图1中反应[5]所示,当钠长石和石英存在时,该反应发生时白云母消失,形成 Al_2SiO_5 、钾长石和熔体。白云母脱水熔融反应可以在岩石中形成约10%的熔体^[26-27]。很多条带状混合岩和造山带中白云母花岗岩的形成与白云母的脱水熔融有关^[34]。White等(2001)^[27]把白云母的脱水熔融反应作为泥质岩中的“有效固相线”(effective solidus)。

在 NKFMASH (Na_2O - K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O)体系中,白云母脱水熔融反应[6]中有石榴石和黑云母参与,向低压方向终止于 NKFASH (Na_2O - K_2O - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O)亚体系的不变点上,其温度与反应[5]非常接近,说明 FeO 和 MgO 对白云母脱水熔融反应影响不大。随着岩石中 Na_2O 降低,白云母脱水熔融反应温度升高。在 KFMASH 中的白云母脱水熔融反应[7]比反应[6]

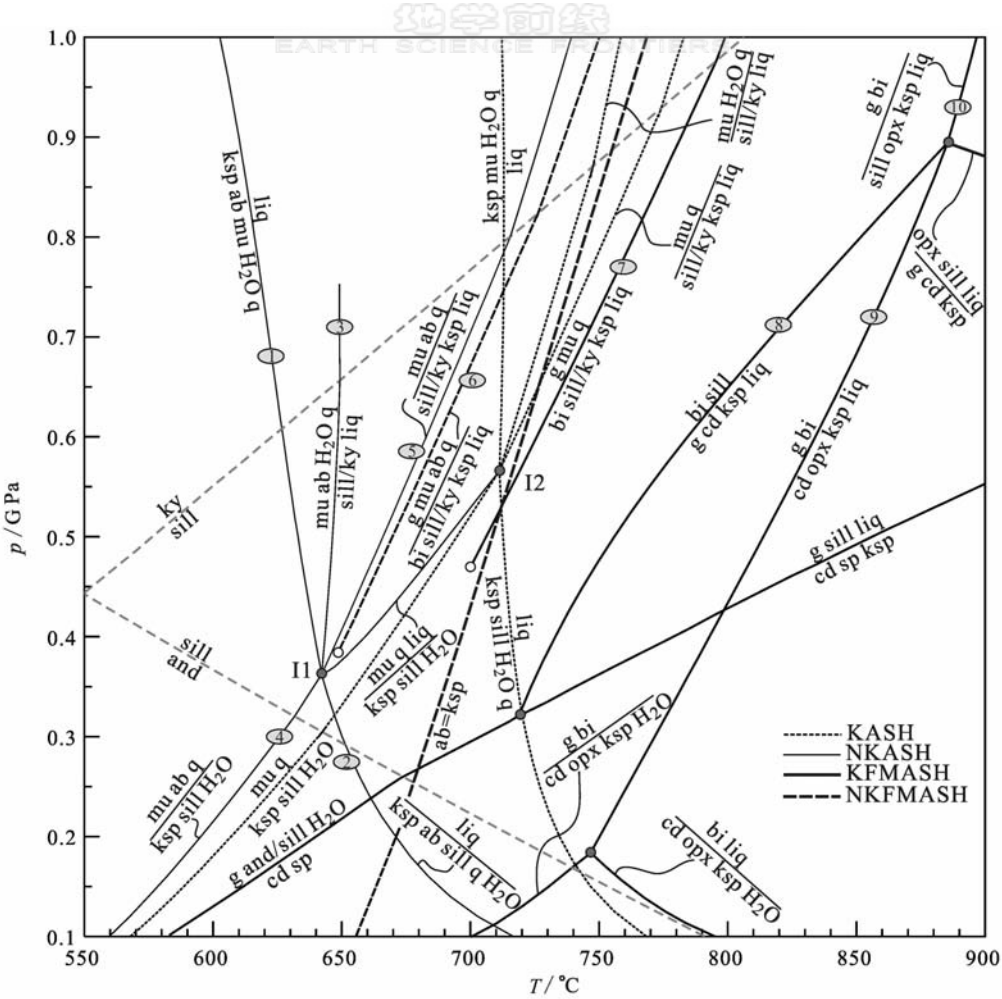


图 1 利用 THERMOCALC323 计算的岩石成因格子

Fig. 1 Petrogenetic grid calculated by THERMOCALC323

图中 KFMASH 体系只表示了重要的单变线和不变点(详见 Wei et al., 2004^[28])。NKFMASH 体系只表示一条单变线。图中粗虚线 $ab=ksp$ 是利用 Thermocalc 程序计算的碱性长石固溶体分解线的临界点

高 30~40℃。泥质岩中的高压麻粒岩相组合蓝晶石+钾长石应该是白云母脱水熔融反应的产物^[36]。

(3) 黑云母的脱水熔融反应。只有在 KFMASH($K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$)体系中,黑云母脱水熔融才能表现为相律自由度为 1 的单变反应,如图 1 中反应[8]、[9]。由于该反应的温度超过了钠长石和钾长石固溶体分解线,在 NKFMASH 体系中,两种长石合并为一种长石,相律自由度为 2。反应[8]使黑云母和夕线石不再共生,形成石榴石+堇青石+钾长石+熔体,如果岩石中黑云母过量,通过反应[9]形成含有斜方辉石的组合。在压力大于 0.9~1.0 GPa 时,黑云母脱水熔融反应如图 1 中反应[10],形成紫苏辉石+ Al_2SiO_5 组合。

黑云母脱水熔融反应可在泥质岩中形成超过 30% 的熔体,很多条纹状混合岩和混合片麻岩的形

成与该反应有关。Winkler(1979)^[35]把反应[8]作为泥质岩进入麻粒岩相的标志反应,在压力为 0.4~0.7 GPa 的中低压条件下,温度为 730~820℃,该反应的斜率较缓,因此可以在造山带减压过程中发生熔融(decompressive melting)。

2 KFMASH 和 NCKFMASH 体系中泥质岩深熔过程模拟

封闭体系中的变质过程就是一定化学成分的岩石随着 $p-T$ 条件的变化而发生矿物组合的变化。模拟这一过程的最好方式就是计算基于一定化学成分的 $p-T$ 视剖面图^[30]。我们首先选择泥质岩石的经典体系——KFMASH 体系^[35]模拟其深熔过程。基于泥质岩的平均化学成分所计算的 $p-T$ 视剖面

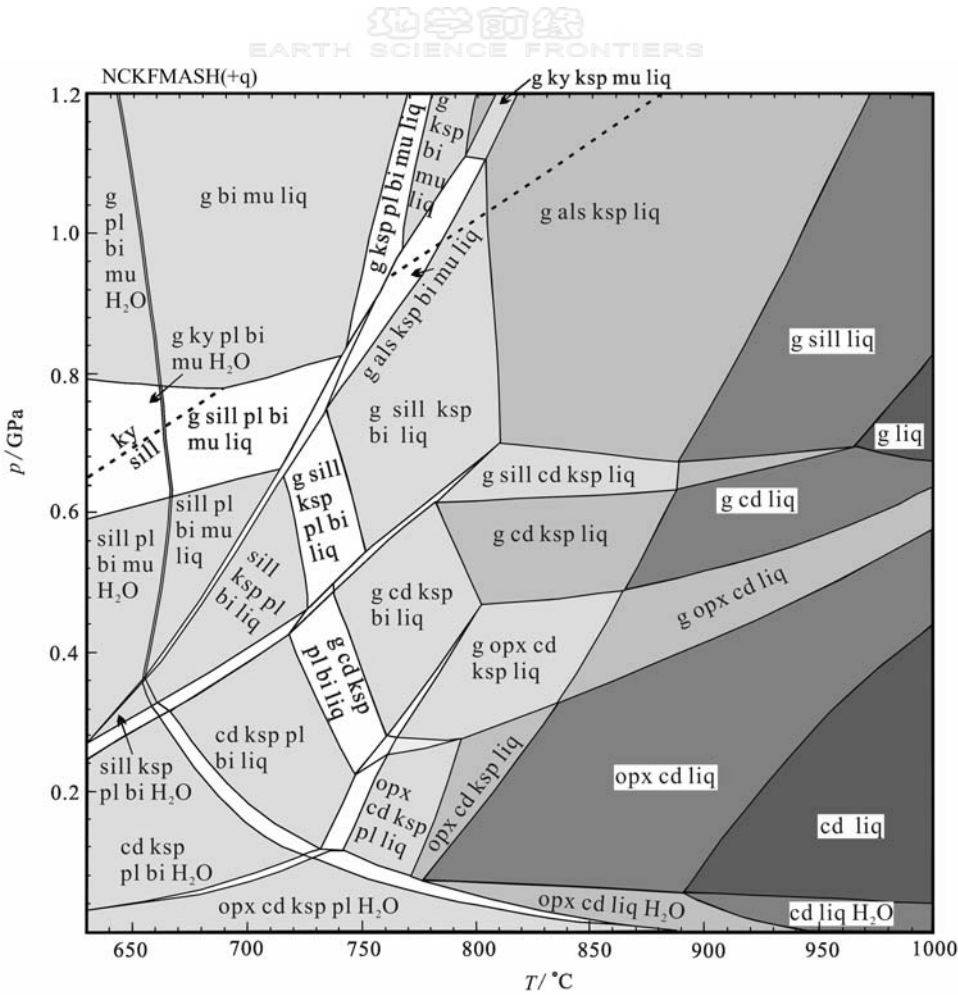


图3 平均成分泥质岩在 NCKFMASH 体系中的 p - T 视剖面图解
(据 White et al. , 2001^[27])

Fig. 3 p - T pseudosection of an average composition pelite in NCKFMASH system
全岩成分: Al_2O_3 为 30.66%, FeO 为 23.74%, MgO 为 12.47%, CaO 为 0.97%, Na_2O 为 1.94%,
 K_2O 为 9.83%, H_2O 为 20.39%, 假设石英过量, 其他图例同图 2

中 NKASH 亚体系中固相线[2]、[3]对比。亚体系中的白云母和黑云母脱水熔融反应在 NCKFMASH 全体系中变为一系列狭窄的双变域和三变域, 其中白云母脱水熔融的温度条件介于反应[6]和[7]之间, 与 KFMASH 体系的固相线[11]接近; 黑云母脱水熔融的温度比反应[8]和[9]低 10~15℃。White 等(2001)^[27]指出 NCKFMASH 体系中的一个重要特征是全体系中铁镁矿物的平衡关系受着 KFMASH 亚体系中矿物相平衡关系控制, 对比图 2 和图 3 很容易发现这一点。因此, 我们基本上可以利用简单的 KFMASH 体系讨论高级变质泥质岩尤其是麻粒岩相的相平衡关系。

White 等(2001)^[27]讨论了等压($p=0.5\text{ GPa}$)加热过程中, 熔体含量及成分的变化(图 4)。组成

为 sill+pl+bi+mu+ H_2O +(q) 的岩石升温到~662℃发生连续反应, 形成约 3%的熔体, 直到白云母脱水熔融反应之前, 岩石中的熔体含量基本不变。白云母的脱水熔融反应发生于一个狭窄的三变域中(684~686℃), 在岩石中产生~9%的熔体, 岩石中熔体含量基本不变。黑云母脱水熔融反应表现为 2 个三变域和一个双变域, 温度介于 725~740℃, 在岩石中形成~23%的熔体, 以后熔体含量随温度升高而增加。熔体成分变化特点为随着温度升高, 熔体中水含量降低, K_2O 增加, Na_2O 降低。

White 等(2001)^[27]研究发现在固相线以上的变质过程中, 长石的稳定性与母岩成分有关。如在泥质岩中, 无论矿物组合如何, 斜长石都将会在约 750℃时耗尽, 钾长石则可稳定到更高温度条件; 而

在杂砂岩中斜长石比钾长石更稳定。但在不同成分的母岩中,铁镁硅酸盐矿物的相平衡关系都与 KF-MASH 体系中的相平衡关系相似。

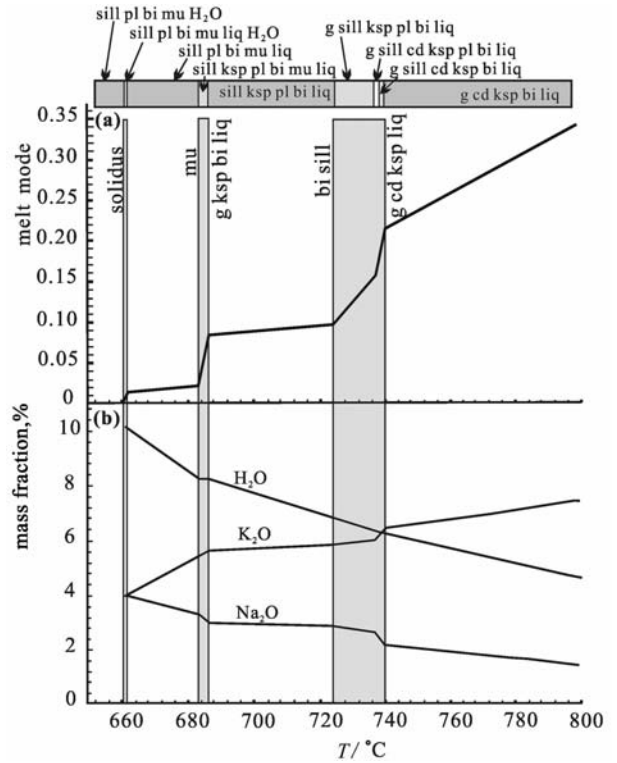


图 4 (a)0.5 GPa 时熔体含量(melt mode, 以 1 个氧化物为基础的摩尔数)与温度的关系;
(b)熔体成分与温度的关系
(据 White et al. , 2001^[27])

Fig. 4 (a) Melt mode (on one-oxide basis) as a function of temperature at 0.5 GPa, (b) The main melt composition variations with temperature

3 熔体的分馏与结晶作用

在变质过程中,熔体的行为既不像水那样总是从体系中分离出去,也不像固态矿物相那样保留在体系中。它们不同程度地从体系中分馏出去,而且,留在体系中的熔体会发生结晶,引起不同程度的逆反应和退变质作用。White 等(2001)^[27]首次定量计算了熔体的丢失与获得,以及麻粒岩相岩石得以保存的条件。

如图 5,表示残余物和熔体混合物的 T-X 视剖面图。如果熔融反应发生在封闭体系中,就没有熔体丢失。当 $p=0.5\text{ GPa}$, $T=760^{\circ}\text{C}$ 时,岩石中的矿物组合为 $\text{g-cd-ksp-bi-liq} (+\text{q})$, 熔体含量约为 27%, 为麻粒岩相。若发生等压冷却,沿图 5 中路

径 A 降温,经过相当于黑云母脱水熔融反应的区域(包括 $\text{g-sill-cd-ksp-bi-liq}$, $\text{g-sill-cd-ksp-pl-bi-liq}$, $\text{g-sill-ksp-pl-bi-liq}$),约有 17% 熔体结晶(参考图 4),伴随堇青石消失,出现斜长石和夕线石。继续降温石榴石消失,当经过相当于白云母脱水熔融反应的狭窄三变域($\text{sill-ksp-pl-bi-mu-liq}$),又有约 6% 熔体结晶,出现白云母。当经过固相线时,全部熔体结晶,矿物组合变为 $\text{sill-pl-bi-mu-H}_2\text{O}$ 。显然,封闭体系中经历麻粒岩相的岩石降温会退变质回到固相线,从而抹掉麻粒岩相的特征。高级区中大面积麻粒岩组合保存的事实说明熔体发生了丢失。

如果在 $p=0.5\text{ GPa}$, $T=760^{\circ}\text{C}$ 时,岩石中的熔体全部丢失,其残余矿物组合 $\text{g-cd-ksp-bi} (+\text{q})$ 会在降温过程(路径 B)中保留下来;如果岩石体系丢失约 20% 的熔体,沿路径 C 降温,随着熔体结晶,固相矿物组合成分沿固相线(图 5 中粗点线)变化,降温至 $\text{g-sill-cd-ksp-bi-liq}$ 三变域时,出现夕线石,至 $\text{g-sill-cd-ksp-bi-pl-liq}$ 双变域时,出现斜长石,降温至固相线时,全部熔体结晶。此时矿物组合为 $\text{g-sill-cd-ksp-pl-bi} (+\text{q})$,若熔体结晶放出的水离开体系,这一固相线上的矿物组合就会被保留下来,在进一步降温过程中不会变化;如果岩石体系获得约 33% 的熔体,会沿路径 D 降温,固相矿物组合沿固相线变化,直到与降温路径相交时,全部熔体结晶,形成矿物组合 $\text{ksp-pl-bi-mu-H}_2\text{O} (+\text{q})$ 。

显然,在包含熔体的变质过程中,最终形成的矿物组合与熔体的分馏与结晶作用密切相关。White 和 Powell (2002)^[32]指出能够使麻粒岩相组合得以保存所需要的熔体分离数量取决于全岩成分、熔体分离次数和 p - T 条件。在铝质泥质岩中,需要把黑云母脱水熔融反应产生的所有熔体分离出去,才能保留麻粒岩相组合。相反,在亚铝质泥质岩中只需要分离一半的熔体,就可以保留峰期组合。因此,在不同成分的泥质麻粒岩中分离出同样数量的熔体,其峰期组合的保留程度会很不相同。

4 混合岩成因模型

混合岩是岩石学中的一个古老课题,很多学者都对此做过详细阐述。Kriegsman(2001)^[6]对曾经流行的混合岩成因模型进行了总结(见图 6)。虽然以往的混合岩成因模型也强调深熔作用和熔体分馏,但没有注意熔体分馏程度和结晶作用的影响。

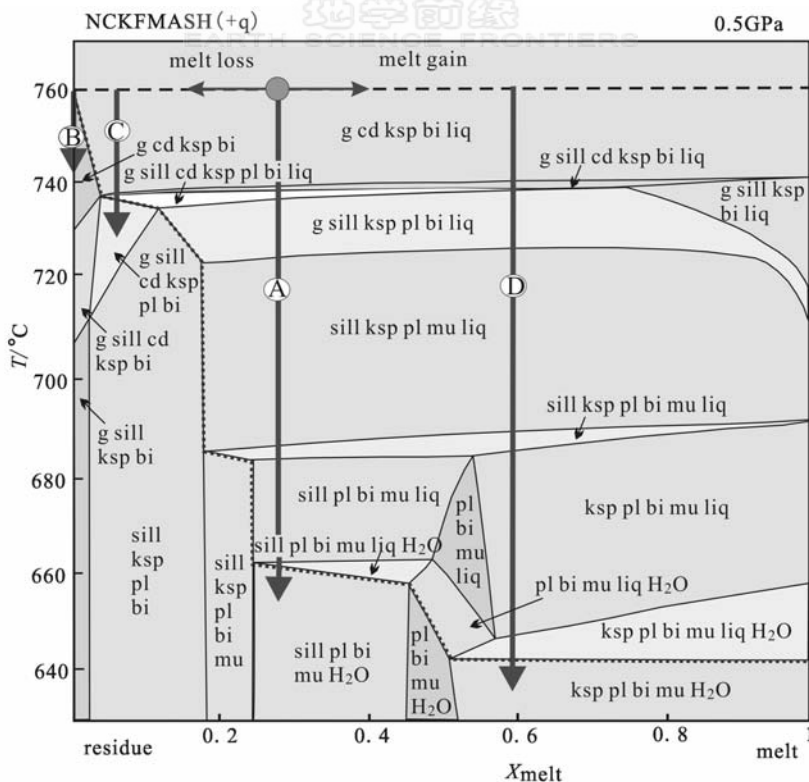


图5 代表残余物($X=0$)和熔体($X=1$)混合物的 T - X 视剖面图($p=0.5$ GPa)
(据 White et al., 2001^[27])

Fig. 5 T - X pseudosection at 0.5 GPa for a composition range representing mixtures of the residue ($X=0$) and melt ($X=1$)

当 $T=760^{\circ}\text{C}$, $p=0.5$ GPa 时, 残余物成分: Al_2O_3 为 33.69%, FeO 为 31.77%, MgO 为 16.82%, CaO 为 0.96%, Na_2O 为 0.66%, K_2O 为 8.76%; 熔体成分: Al_2O_3 为 22.31%, FeO 为 1.57%, MgO 为 0.47%, CaO 为 1.00%, Na_2O 为 5.47%, K_2O 为 12.76%, H_2O 为 56.42% (摩尔分数)

实际上,在多数高级变质岩石中,通过变质反应使岩石发生部分熔融,所形成的部分熔体不断在岩石体系中局部集中,发生分凝作用,或从岩石体系中分离出去,形成各种侵入体,留在体系内的熔体在降温过程中发生结晶作用,引起峰期矿物组合不同程度地经历逆反应和退变质反应。因此,我们所见到的高级变质岩或混合岩通常是经历部分熔融→部分熔体分馏→部分退变质改造的产物。

基于这样一个基本认识, Kriegsman (2001)^[6] 提出一个新的混合岩成因模型,认为混合岩形成包括三个阶段:第一阶段 部分熔融作用使母岩变为残留体(中色体)+熔体;第二阶段 部分熔体发生分凝作用(segregation);第三阶段 部分退变反应,包含两个同时进行的过程:(a)分凝的熔体+相邻的残留体→浅色体+暗色体;(b) 残留体和最后残留的熔体→最后的中色体(图7)。

该模型与早期混合岩成因模型不同的是强调了退变质作用对混合岩组构的影响,并且对混合岩的

各组成部分也有新的认识。早期学者如 Mehnert (1968)^[2] 认为混合岩的中色体是未被改造的部分,称为古成体(paleosome),暗色体代表残留体,浅色体代表熔体。但后来研究发现中色体更接近于残留体,暗色体是熔体与残留体发生退变反应的产物,浅色体同样受到了退变质作用影响,也不能简单地对应熔体成分^[6, 25]。

5 结论

(1)大部分高级变质作用都有熔体参与,无论岩石是否有混合岩外貌,变质沉积岩中熔融作用主要有三种机制:固相线上的熔融、白云母脱水熔融和黑云母脱水熔融,在不同模式体系中这些反应的自由度和 p - T 条件不同。

(2)利用经典的 KFMASH 体系可以模拟麻粒岩相泥质岩的相平衡关系,但其固相线比实际高 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$,因此,模拟高级泥质岩石的相平衡关系最好

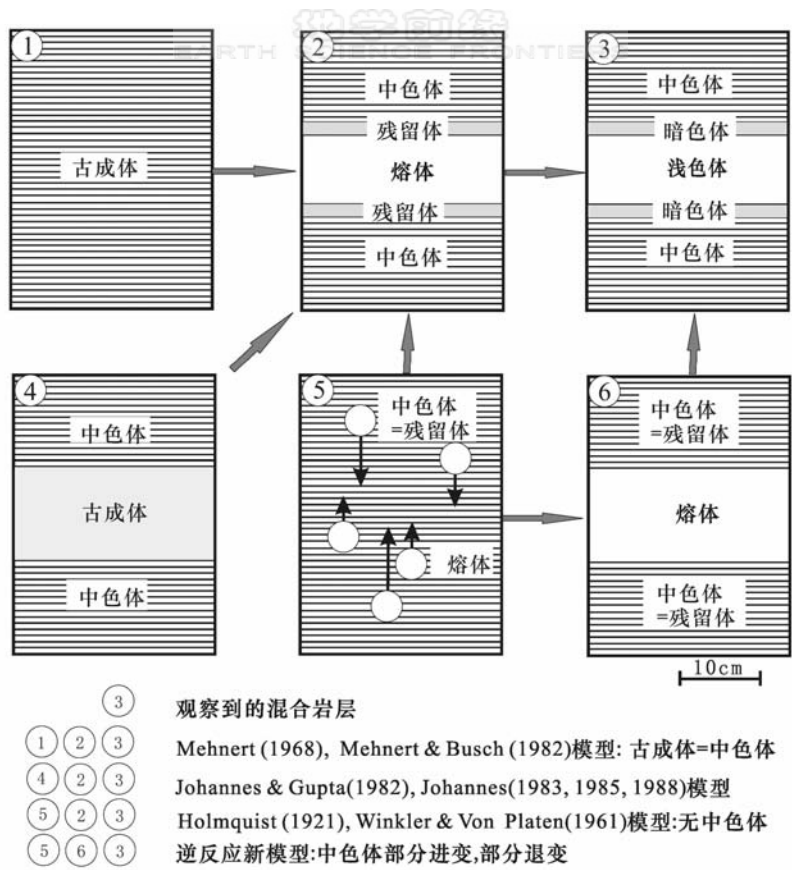


图 6 混合岩成因模型图示
(据 Kriegsman,2001^[6])
Fig. 6 Schematic representation of migmatite models

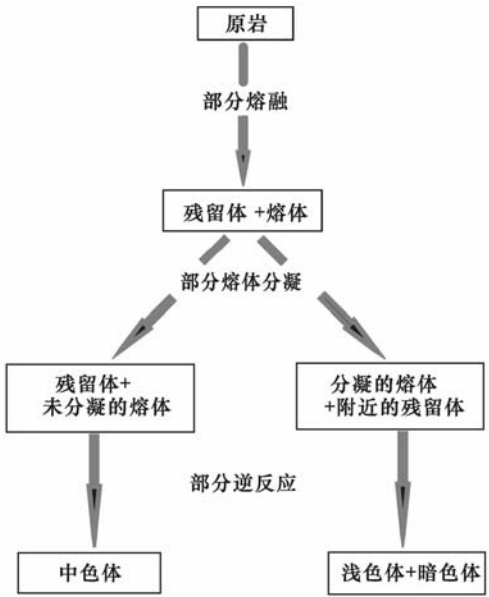


图 7 封闭系统混合岩假设的三阶段演化流程图
(据 Kriegsman,2001^[6])
Fig. 7 Flow diagram to illustrate the postulate three-stage evolution of migmatites in a closed system

在 NCKFMASH 体系中进行。在 NCKFMASH 体系中,控制泥质岩深熔作用的三类变质反应表现为自由度 ≥ 2 的连续反应。

(3)如果岩石中所形成的熔体全部保留在岩石体系内,那么,熔体的结晶会引起一系列逆反应,使在峰期阶段形成的无水矿物组合完全退变为固相线组合。如果岩石中所形成的熔体全部从岩石中分离出去,那么,岩石在降温过程中几乎不发生退变反应。实际上最可能的情况是部分熔体从岩石体系中分离出去,使得退变质反应或逆反应难以达到平衡。麻粒岩相组合之所以被保留下来,是因为发生了熔体分馏。

(4)混合岩的形成过程包括部分熔融作用、不同程度熔体分凝与汲取和不同程度的逆反应和退变反应。

(5)利用 THERMOCALC 程序和 pseudosection 方法可以定量研究固相线以上的熔体形成、熔体分馏和退变质反应。

References:

- [1] Holmquist P J. Typen und nomenklatur der adergesteine[J]. GFF, 1921, 43: 613-631.
- [2] Mehnert K R. Migmatites and the origin of granitic rocks [M]. Amsterdam:Elsevier, 1968: 393.
- [3] Johannes W, Gupta L N. Origin and evolution of a migmatite [J]. Contrib Mineral Petrol, 1982, 79:114-123.
- [4] Ashworth J R. Migmatites[M]. Glasgow, UK: Blackie and Son, 1985:36-85.
- [5] Ashworth J R, Brown M. An overview of diverse responses to diverse processes at high crustal temperatures[M]// Ashworth J R, Brown M. High-temperature metamorphism and crustal anatexis. Mineral Soc Ser 2. London: Unwin Hyman, 1990:1-18.
- [6] Kriegsman L M. Partial melting, partial melt extraction, and partial back reaction in anatectic migmatites [J]. Lithos, 2001, 56: 75-96.
- [7] Vernon R H, Clarke G L, Collins W J. Local, mid-crustal granulite facies metamorphism and melting: an example in the Mount Staford area, central Australia[M]// Ashworth J R, Brown M. High-temperature metamorphism and crustal anatexis. London: Unwin Hyman, 1990:272-319.
- [8] Brown M. Crustal anatexis and ascent of felsic magmas[J]. Lithos, 1994, 32: 109-168.
- [9] Brown M, Averkin Y A, McLellan E L, et al. Melt segregation in migmatites [J]. J Geophys Res, 1995, B100: 15655-15679.
- [10] Sawyer E W. Criteria for the recognition of partial melting [J]. Physics Chemistry Earth, 1999, A24: 269-279.
- [11] Sawyer E W. Melt segregation in the continental crust: distribution and movement of melt in anatectic rocks [J]. J Metamorphic Geol, 2001, 19: 291-309.
- [12] Greenfield J E, Clarke G L, Bland M, et al. In-situ migmatite and hybrid diatexite at Mt Staford, central Australia [J]. J Metamorphic Geol, 1996, 14: 413-426.
- [13] Greenfield J E, Clarke G L, White R W. A sequence of partial melting reactions at Mt Staford, central Australia[J]. J Metamorphic Geol, 1998,16: 363-378.
- [14] Mengel K, Richter M, Johannes W. Leucosome-forming small scale geochemical processes in the metapelitic migmatites of the Turku area, Finland[J]. Lithos, 2001, 56: 47-73.
- [15] Huang W L, Robertson J K, Wyllie P J. Melting relations of muscovite to 30 kilobars in the system $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ [J]. Am J Sci, 1973, 273: 415-427.
- [16] Huang W L, Wyllie P J. Melting relations of muscovite with quartz and sanidine in the $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ system to 30 kilobars and an outline of paragonite melting relations[J]. Am J Sci, 1974, 274: 378-395.
- [17] Le Breton N, Thompson A B. Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in metapelites in the early stages of crustal anatexis[J]. Contrib Mineral Petrol, 1988, 99: 226-237.
- [18] Patin  O, Douce A E, Johnston A D. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites [J]. Contrib Mineral Petrol, 1991, 107: 202-218.
- [19] Vielzeuf D, Holloway J R. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system: consequences for crustal differentiation[J]. Contrib Mineral Petrol, 1988, 98: 257-276.
- [20] Vielzeuf D, Montel J M. Partial melting of metagreywackes I. Fluid-absent experiments and phase relationships[J]. Contrib Mineral Petrol, 1994, 117: 375-393.
- [21] Carrington D P, Harley S L. Partial melting and phase relations in high-grade metapelites: an experimental petrogenetic grid in the KFMASH system [J]. Contrib Mineral Petrol, 1995, 120: 270-291.
- [22] Thompson A B. Dehydration melting of pelitic rocks and the generation of H_2O -undersaturated granitic liquids[J]. Am J Sci, 1982, 282: 1567-1595.
- [23] Thompson A B. Clockwise p - T paths for crustal melting and H_2O recycling in granite source regions and migmatite terrains[J]. Lithos, 2001, 56: 47-74.
- [24] Grant J A. Phase equilibria in low-pressure partial melting of pelitic rocks[J]. Am J Sci, 1985, 285: 409-435.
- [25] Powell R, Downes J. Garnet porphyroblast-bearing leucosomes in metapelites: mechanisms, phase diagrams and an example from Broken Hill, Australia[M]// Ashworth J R, Brown M. High-temperature metamorphism and crustal anatexis. London: Unwin Hyman, 1990:105-123.
- [26] Spear F S, Kohn M J, Cheney J T. p - T paths from anatectic pelites[J]. Contrib Mineral Petrol, 1999, 134: 17-32.
- [27] White R W, Powell R, Holland T J B. Calculation of partial melting equilibria in the system $Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ (NCKFMASH) [J]. J Metamorphic Geol, 2001, 19: 139-153.
- [28] Wei C J, Powell R, Clarke G L. Calculated phase equilibria for low-and medium-pressure metapelites in the KFMASH and KMnFMASH systems [J]. J Metamorphic Geol, 2004, 22: 495-508.
- [29] Holland T J B, Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. J Metamorphic Geol, 1998, 16: 309-343.
- [30] Powell R, Holland T, Worley B. Calculating phase diagram involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC[J]. J Metamorphic Geol, 1998, 16: 577-586.
- [31] Wei Chunjing, Zhou Xiwen. Progress in the study of metamorphic phase equilibrium[J]. Earth Science Frontiers, 2003,

- 10(4): 341-352 (in Chinese).
- [32] White R W, Powell R. Melt loss and the preservation of granulite facies mineral assemblages [J]. J Metamorphic Geol, 2002, 20: 621-632.
- [33] White R W, Powell R, Clarke G L. Prograde metamorphic assemblage evolution during partial melting of metasedimentary rocks at low pressures: migmatites from Mt Stafford, Central Australia[J]. J Petrol, 2003, 44: 1937-1960.
- [34] Brown M. Retrograde processes in migmatites and granulites revisited[J]. J Metamorphic Geol, 2002, 20: 25-40.
- [35] Winkler H G F. Petrogenesis of metamorphic rocks[M]. 5th ed. New York: Springer-Verlag, 1979: 348.
- [36] Green D H, Ringwood A E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1967, 31: 767- 833.

参考文献:

- [31] 魏春景,周喜文. 变质相平衡研究进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(4):341-352.

致《地学前缘》爱思唯尔(Elsevier)英文版作者

尊敬的作者:您好!

《地学前缘》被世界最大的科技出版公司 Elsevier 选入中国合作期刊,并获得了国际标准刊号(ISSN 1872-5791)。从 2007 年起入选的《地学前缘》文章英文版将在 ScienceDirect 在线全文平台上发表,Elsevier 的 1 700 万用户,包括全球著名的大学、图书馆、科研机构等都可以进行在线阅读。

中国期刊在全球科技网 ScienceDirect 上发表,将会扩大中国期刊的读者范围,提高中国期刊论文的国际引用率,促进中、外科技界间的学术交流。

送交 Elsevier 发表的稿件是从被《地学前缘》录用的中文稿件中选出并同步译成的英文稿件。英文稿件要求:

(1)译文的标题、姓名、单位、关键词、公式、插图、表格、引文、编号及参考文献等应与《地学前缘》中文原文保持一致,译文内容应与中文主要内容相同,但参考文献的著录格式要遵从下面(6)之规定。

(2)摘要一般为 50~200 个英文词,应能概括全文内容(研究目的、过程、方法、结论);不能含有方程、图表、参考文献等;如用缩略语,应有说明;第一句话不应与题名重复;尽量使用简单句和主动语态,并使动词靠近主语。英文版文章摘要可以与中文原文的英文摘要不同。

(3)关键词一般为 3~8 个;除专有名词大写外,全部小写;缩略语应先写全称再写简称;关键词之间用“;”分隔。具体要求与中文文章的关键词一致。

(4)图中文字的正斜体要与正文统一,图中文字用 7.5 磅 Times New Roman 字体;坐标轴标题和图中每段注释文字的首字母大写;图中字体:江河湖海左斜,山脉右斜;在坐标系中,坐标原点用 O,坐标名称用物理量与其单位之比,量符号用斜体,单位用正体,如“ p/MPa ”,标线刻度统一朝内侧。

(5)图件要求提供 CorelDRAW 或 Illustrator 软件制图格式,或上述软件可处理的矢量图,灰度图存为 600 dpi,彩图存为 300 dpi。双栏排图图不宽于 8 cm;通栏排图图不宽于 16.5 cm,整版图请控制在 16.5 cm \times 22.5 cm 内。表名在表的上方居中排,表头表述方式一般用物理量与其单位之比,如“ p/MPa ”。

(6)参考文献。英文版文章的文后参考文献应与中文原文的尽量保持一致。参考文献采用阿拉伯数字依其在文中第一次出现的先后顺序编号;参考文献中的期刊名用全称或标准缩略形式表示;对于已经同意发表或出版的文章、图书但尚未正式出版的,参考文献列表中应该标明“in press”以说明。参考文献的基本格式示例如下:

For a book: Cover T, Thomas J. Elements for Information Theory. New York: Wiley, 1991.

For a paper in a journal: Zadeh L A. Towards a generalized theory of uncertainty (GTU)—an outline. Information Sciences, 2005, 172:1-40.

For a paper in a contributed volume: Keene A J. A brief comparison of some evolutionary optimization methods. In: Rayward-Smith V, Osman I, Reeves C, et al. Modern Heuristic Search Methods, New York: Wiley, 1996:255-272.

For a paper in a conference proceedings: Ishibuchi H, Nozaki K, Tanaka H. Fuzzy data mining: effect of fuzzy discretization. In: Proc. 1st IEEE International Conference on Data Mining, San Jose, CA, 2001:241-248.

For an unpublished paper: Kryszkiewicz M. Knowledge reduction in information systems. Acta Mathematica Scientia, in press.

《地学前缘》Elsevier 英文版编辑部

联系人:杨永强

电话:82321855

电子信箱:xue_bao88@sina.com