

黑云母片麻岩—H₂O系统 在0.1—0.2GPa压力下的熔融实验

吴宗絮

P. J. Wyllie

(国家地震局地质研究所) (美国加州理工学院地质及行星科学系)

主题词: 冀东; 黑云母片麻岩; 熔融实验; 混合岩化作用; 壳内低速层

提 要: 本文提出了冀东黑云母片麻岩—H₂O系统在0.1—0.2GPa压力下熔融实验的相关系。其固相线温度分别为0.1GPa时762°C, 0.2GPa时712°C。黑云母消失的温度分别为0.1GPa时787°C, 0.2GPa时737°C, 石英消失的温度分别为0.1GPa时837°C, 0.2GPa时787°C。采用Burnham模型计算的在液相线温度下岩浆饱和水的含量分别为0.1GPa时3.8%与0.2GPa时5.8%。根据实验结果以及早前寒武纪时冀东陆壳的古地温可知, 该区早前寒武纪角闪岩相岩石分布的地区广泛出现的混合岩化作用应主要归因于陆壳岩石(黑云母片麻岩等)的局部熔融作用。由实验结果以及现代冀东陆壳的地温可推知, 壳内低速层可能不是由岩石局部熔融所引起, 而是由岩石中含有隙间水流体引起。

黑云母片麻岩是冀东地区中地壳的主要岩石类型, 亦是世界上许多地区中部陆壳的典型岩石。冀东地区属于中国东部大陆新生代以来发育大陆裂谷作用的典型地段, 与稳定大陆岩石圈相比, 其软流圈的埋深浅, 陆壳与岩石圈薄, 中地壳常常为低速高导层。世界大陆内部地震活动区的深部探测结果表明, 大陆浅源地震几乎都发生在壳内低速层或高导层之上。对于壳内低速层的性质常有争论, 是由于岩石的起始熔融引起? 还是由于含有隙间水流体所导致? 广布于中部陆壳的黑云母片麻岩常常伴随混合岩化作用, 它们之间有无某些成生联系? 它对理解早前寒武陆壳的形成与演化具有重要意义。本实验试图为确定陆壳内低速层的物理性质以及中部陆壳广泛发育混合岩化作用提供实验依据。

一、样品的选择

实验用天然岩石样品——黑云母片麻岩, 取自冀东卢龙, 为中地壳的主要岩石类型, 黑云母片麻岩具典型的鳞片花岗变晶结构, 主要由斜长石、石英、黑云母、微斜长石、以及少量绿帘石和角闪石构成, 属角闪岩相, 广泛发育混合岩化作用, 脉体为浅色花岗岩。由电动计积仪测量获得的黑云母片麻岩的实际矿物含量、化学成分以及标准矿物含量一并列于表1。斜长石为中长石 ($An \approx 32$), 钾长石为微斜长石。

编者注: 本文所称黑云母片麻岩习惯称作黑云斜长片麻岩, 如属细粒粒状变晶结构则称黑云母变粒岩。

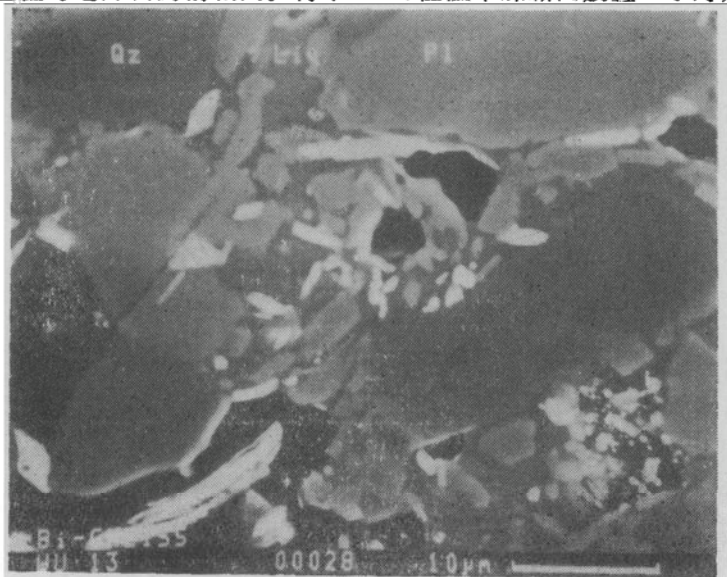
表 1 实验样品黑云母片麻岩的化学组成、CIPW标准矿物成分和实际矿物成分

Table 1 Chemical composition CIPW norms and approximate modes of biotite gneiss studied experimentally

化 学 成 分		CIPW标准矿物成分		实 际 矿 物 成 分	
SiO ₂	65.30	qz	24.49	Qz	24.0
TiO ₂	0.38	or	7.09	Pl	42.0
Al ₂ O ₃	15.40	ab	28.77	Mi	8.0
Fe ₂ O ₃	1.18	an	23.22	Bi	17.0
FeO	2.58	di	1.52	Am	6.0
MnO	.060	hy	10.09	Ep	3.0
MgO	3.04	mt	1.71		
CaO	5.23	il	0.72		
K ₂ O	1.20	ap	0.30		
Na ₂ O	3.40				
P ₂ O ₅	0.13				
H ₂ O ⁺	0.46				
H ₂ O ⁻	0.66				
Total	100.50				

二、实验方法

实验是在冷封式高压釜中进行的。熔融实验用的岩石粉碎至 - 200 目。每次实验称取样品约 20—25mg, 将样品粉末和相应的蒸馏水加入金管后电焊密封。金管密封后必须在天平上称重, 确保其重量与电焊密封前相同。再于110℃恒温干燥箱内放置24小时, 然后取出称重,



照片 1 在0.1GPa、775℃条件下黑云母片麻岩+5% H₂O熔融实验的SEM照片
Photo 1 SEM-photo of biotite-gneiss melting at 0.1GPa, 775℃, 5% H₂O
Bi-Gneiss—黑云母片麻岩; Lig—熔浆; Pl—斜长石; Qz—石英

如果重量不变,说明电焊密封成功,可对样品进行实验。

实验样品分三组,其含H₂O量分别为5%、10%、20%,为了确保其相同的P-T条件,把它们同时放置于一个冷封式高压釜内,样品一次实验的时间为一个月左右,(除了 $t=800^{\circ}\text{C}$ 时一组样品的实验为16天之外)。实验温度的精度为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,压力的精度范围为 $\pm 5\%$ 。每次实验后高压釜在压缩空气下淬火,当温度下降至 100°C 以后,把高压釜放置于冷水中,淬火时保持恒压,平均淬火速度约 $5^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。金管样品从高压釜取出后必须再次称重,以检查金管在高压釜内是否一直处于密封状态。

物相鉴定:有无气相的存在是很重要的,特别是岩石已开始发生局部熔融之后,因为气相的存在表明体系为过量水条件,局部熔浆是水饱和的,否则体系为非过量水状态,局部熔浆则是水不饱和的。观察有无玻璃存在是确定熔浆存在与否的主要标志,主要采用碎屑油浸镜下研究,最后的确认要依据SEM(扫描电镜)资料(照片1)。

矿物相的鉴定主要用碎屑油浸法、XRD(X射线衍射)与SEM法配合进行。

岩石熔融实验与物相的显微镜鉴定是在美国加州理工学院地质与行星科学系P.J. Wyllie教授实验室内进行的,XRD与SEM测定是在该系所属的实验室内进行的。

三、实验结果

黑云母片麻岩—H₂O系统,在 $P=0.1\text{GPa}$, 0.2GPa , $t=700-800^{\circ}\text{C}$ 范围内的实验结果列于表2。固相线与矿物消失(-out)的P-T条件示于图1。

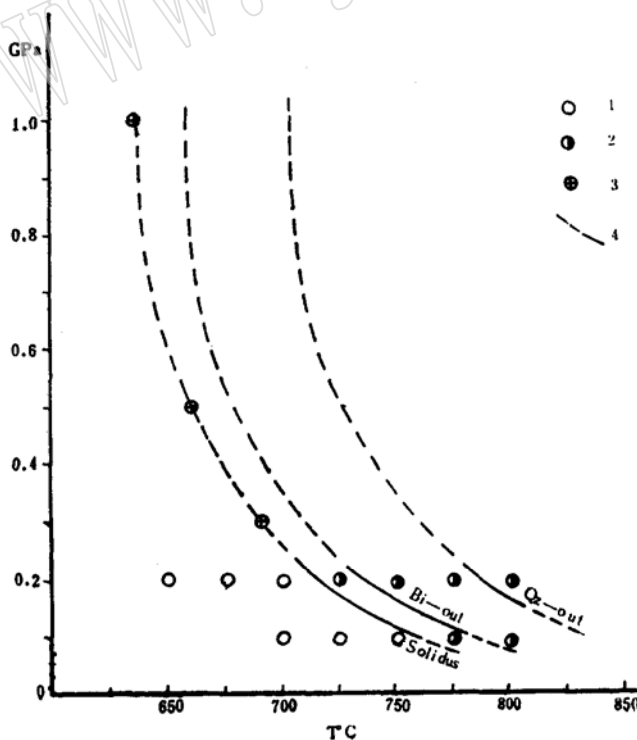


图1 在0.1GPa和0.2GPa条件下黑云母片麻岩—H₂O系统的实验结果

Fig. 1 Melting experiment result of biotite gneiss-H₂O system at 0.1 and 0.2 GPa pressures

1—未熔融样品; 2—已局部熔融样品;
3—英闪长岩固相线(据 Merrill 等, 1970); 4—相界线; Solidus(固相线), Bi-out(黑云母消失的相界线), Qtz-out(石英消失的相界线)

表 2 黑云母片麻岩—H₂O的实验结果

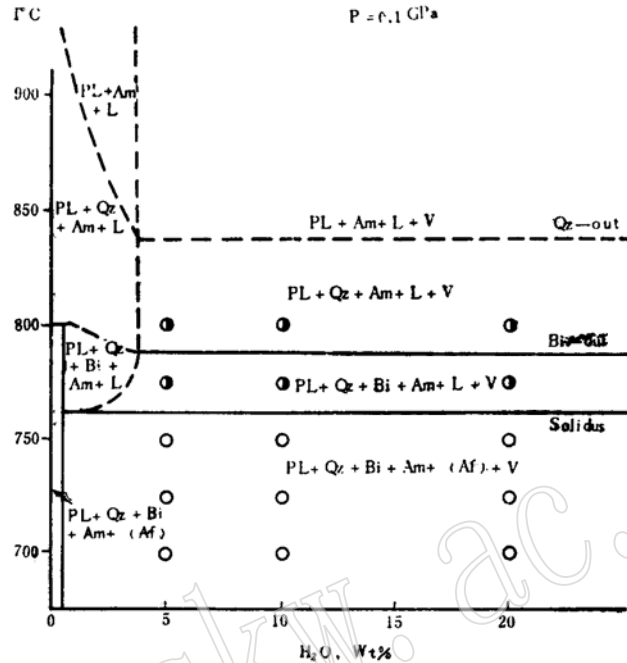
Table 2 Experimental results of biotite gneiss with water

样 号	H ₂ O (Wt%)	压 力 (GPa)	温 度 (°C)	时 间 (天)	相 组 合
37	5	0.1	700	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
38	10	0.1	700	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
39	20	0.1	700	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
1	5	0.1	725	30.5	Bi+Am+Qz+Pl+V
2	10	0.1	725	30.5	Bi+Am+Qz+Pl+V
3	20	0.1	725	30.5	Bi+Am+Qz+Pl+V
4	5	0.1	750	30.5	Bi+Am+Qz+Pl+V
5	10	0.1	750	30.5	Bi+Am+Qz+Pl+V
6	20	0.1	750	30.5	Bi+Am+Qz+Pl+V
13	5	0.1	775	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V+L
14	10	0.1	775	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V+L
15	20	0.1	775	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V+L
28	5	0.1	800	32.0	Am+Qz+Pl+V+L
29	10	0.1	800	32.0	Am+Qz+Pl+V+L
30	20	0.1	800	32.0	Am+Qz+Pl+V+L
34	5	0.2	650	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
35	10	0.2	650	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
36	20	0.2	650	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
16	5	0.2	675	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
17	10	0.2	675	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
18	20	0.2	675	31.0	Bi+Am+Qz+Pl+V
7	5	0.2	700	31.8	Bi+Am+Qz+Pl+V
8	10	0.2	700	31.8	Bi+Am+Qz+Pl+V
9	20	0.2	700	31.8	Bi+Am+Qz+Pl+V
10	5	0.2	725	31.8	Bi+Am+Qz+Pl+L
11	10	0.2	725	31.8	Bi+Am+Qz+Pl+V+L
12	20	0.2	725	31.8	Bi+Am+Qz+Pl+V+L
19	5	0.2	750	32.0	Bi+Am+Qz+Pl+L
20	10	0.2	750	32.0	Am+Qz+Pl+V+L
21	20	0.2	750	32.0	Am+Qz+Pl+V+L
22	5	0.2	775	32.0	Am+Qz+Pl+L
23	10	0.2	775	32.0	Am+Qz+Pl+V+L
24	20	0.2	775	32.0	Am+Qz+Pl+V+L
25	5	0.2	800	16.0	Am+Qz+Pl+L
26	10	0.2	800	16.0	Am+Pl+V+L
27	20	0.2	800	16.0	Am+Pl+V+L

Bi—黑云母; Am—角闪石; Qz—石英; Pl—斜长石; V—气相; L—熔浆, 下同。

在0.1GPa条件下(图2), 加入5%、10%和20%的H₂O时, 黑云母片麻岩的起始熔融温度(即固相线)为762℃, 黑云母消失的温度为787℃, 石英消失的温度为837℃; 0.2GPa时(图3), 实验样品中加入5%、10%、20%的H₂O, 其起始熔融温度为712℃, 在加入5%H₂O时, 黑云母消失的温度为762℃, 石英消失的温度将>800℃, 当加入10%和20%H₂O时, 黑云母消失的温度为737℃, 石英消失的温度为787℃。

实验表明, 加入10%、20%的H₂O后, 在0.1GPa与0.2GPa的压力条件下, 均属过量水

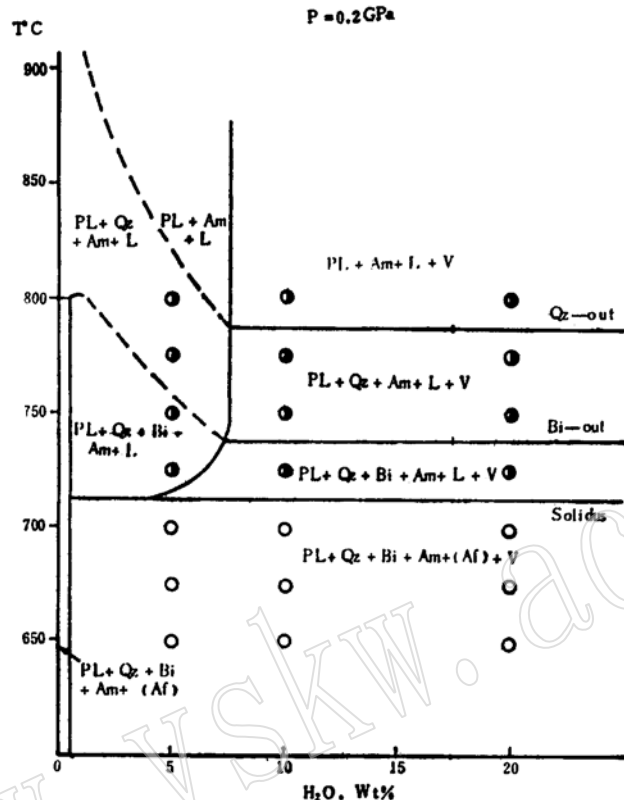
图2 在0.1GPa条件下黑云母片麻岩—H₂O系统的相关系Fig. 2 Phase relationship of biotite gneiss—H₂O system at 0.1GPa pressures

Af—碱性长石, 其它符号含义同表2

系统, 产生的岩浆是饱和水的。加入5% H₂O 的实验在 0.1GPa 压力下属过量水系统, 在 0.2 GPa 压力条件下, 对固相线温度来说虽属过量水体系, 但温度升高约10℃后, 已不属于过量水系统, 产生的岩浆是水不饱和的。

四、黑云母片麻岩—H₂O系统的相关系

本实验主要研究固相线与固相线—液相线之间的固—液平衡区靠近固相线一侧的相关系。P = 0.1与0.2GPa时的T—X剖面示于图2、3。图2、3表示的黑云母片麻岩—H₂O系统中几个不同部分有不同的相关系。低于固相线温度的区段, 包括出现气相的过量水系统部分, 无气相时系统中水赋存于含水矿物 (Bi、Hb 与 Ep) 中的含水矿物系统部分 (以靠近纵座标的长方框表示) 与无气相、亦无含水矿物的无水 (或干) 系统部分 (以纵座标表示, H₂O 为 0%)。对应这三个系统部分有三个不同的固相线温度, 过量水系统部分0.1与0.2GPa 压力下的固相线温度分别为 762℃与712℃; 含水矿物系统部分由 0.1GPa 压力下在活塞—汽缸或高压装置中完成的不加水的黑云母片麻岩的熔融实验 (将另文发表) 外推低压下固相线温度约为 800℃; 干系统部分固相线温度将大于 950℃ (P. J. Wyllie, 1977)^[1]。对于低于固相线温度的过量水体系来说 (即本实验研究的部分), 当达固相线温度 (即开始熔融) 时, 系统中有气相存在, 表示仍保持过量水条件, 岩浆为饱和水的。但是, 在 P = 0.2GPa 条件下含 H₂O 5%, P = 0.1GPa 时含水 3% 高出固相线温度约 10℃后, 气相消失, 系统便处于不饱和水条

图3 在0.2GPa条件下黑云母片麻岩-H₂O系统的相关关系Fig. 3 Phase relationship of biotite gneiss-H₂O system at 0.2 GPa pressures

(图中符号含义同前)

件, 岩浆是不饱和水的, 分别见图3和图2 $Pl + Qz + Bi + Am + L$ 区。这说明, 加入自由水的系统, 虽然在固相线与固相线之下的温度时有气相出现, 为过量水体系, 但是, 当温度稍大于固相线温度时, 就明显地分出二个区段, 右侧为矿物+熔浆+气相的区段, 左侧则为矿物+熔浆而无气相的区段, 这是一个不饱和水的区段。不饱和水的岩浆区段与饱和水的岩浆区段的界线在0.1与0.2GPa时分别为4%与7.5% H_2O 含量处, 后者是指总体系的水含量, 而不是局部熔浆中水的含量。

由图3可看出, 在 $P = 0.2 \text{ GPa}$ 条件下, 黑云母消失 (Bi-out) 的温度在气相存在的体系中为737°C, 在无气相区, 黑云母消失的温度是不定的, 水含量为5%时约762°C, 随着水含量的减小黑云母消失的温度升高, 直至不加自由水的系统时黑云母消失的温度约为800°C。 $P = 0.1 \text{ GPa}$ 时在气相出现的区段, 黑云母消失的温度为787°C, 按 $P = 0.2 \text{ GPa}$ 的相图(图2), 可推测在无气相的区段, 随着含水量的减少, 其温度从787°C上升达800°C。

黑云母片麻岩在0.1GPa与0.2GPa压力下的固相线温度接近于英云闪长岩的固相线 (Merrill 等, 1970)⁽²⁾, 由此外推其液相线温度亦可能接近于英云闪长岩的液相线温度(0.1GPa时为1100°C, 0.2GPa时为1000°C (Piwiskii, 1968; Wyllie, 1977)^{(3),(1)}, 因此图4中的曲线2与曲线3基本重合。采用Burnham (1979)⁽⁴⁾ 的模型, 假设0.1与0.2GPa压力时液相线温度分别为1100°C与1000°C, 则岩浆饱和水的含量分别为3.8%与5.8%。它从另一个侧面论

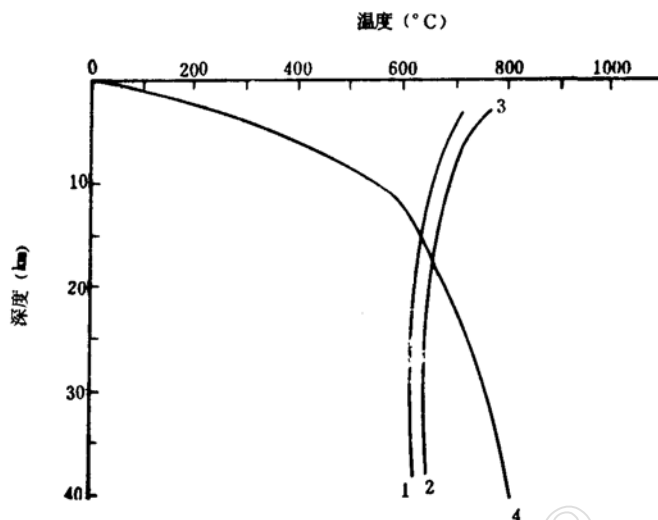


图4 深度—温度关系图

Fig. 4 Depth—temperature relationship

固相线: 1—花岗岩—H₂O; 2—英云闪长岩—H₂O; 3—冀东黑云母片麻岩—H₂O;
4—冀东前寒武纪古地温

证了实验结果的正确性, 即0.1GPa时加入5%的H₂O后体系已进入过量水条件, 而0.2GPa时加入5%的H₂O不能进入过量水体系, 只有当加入的水大于5.8%以后才为过量水条件。

讨 论

1. 固相线温度 黑云母片麻岩中含有少量绿帘石, 绿帘石的存在使岩石里斜长石中 *An* 含量减少。在0.1—0.2GPa压力下, 绿帘石将在低于固相线温度时分解形成 *An* 而进入斜长石中, 但由于熔融实验时升温时间短促, 有可能使绿帘石在低于固相线温度时不能分解形成 *An* 组分。已有的实验表明花岗岩类—片麻岩类岩石中固相线的温度与岩石中斜长石的 *An* 含量呈反相关关系 (Winkler, 1976)⁽⁵⁾, 因此, 黑云母片麻岩熔融实验确定的固相线温度应该比完全达到平衡的 (即绿帘石先分解使斜长石中 *An* 含量增高) 片麻岩的固相线温度低。但由于岩石中绿帘石含量低, 因此对固相线温度的影响可能不大。

2. 混合岩化问题 图5表示了冀东早前寒武纪的古地温以及黑云母片麻岩与花岗岩在过量水条件下的起始熔融曲线, 古地温与二条固相线的交点分别为15km与17km, 它表明, 早前寒武时期中地壳内具中酸性组成的角闪岩相岩石 (角闪岩相岩石位于15—25km, 相当于中地壳部位) 应该广泛出现局部熔融作用。这样, 冀东早前寒武纪角闪岩相岩石分布的地区广泛出现的混合岩化作用主要应归因于陆壳岩石的局部熔融作用。

3. 壳内低速层的性质 由图5可知, 冀东中地壳现在的温度为350°C (15km)→595°C (25km), 在中地壳深度范围内现代地温曲线与花岗岩固相线不相交, 它表明中地壳内岩石不能发生局部熔融作用。如果取居里等温面 (深约15—20km) 为500—550°C的话, 由图5亦可推知, 还没有达到固相线的温度。因此, 现代中地壳低速层可能不是由于岩石的局部熔融引起, 或者说那里可能不存在花岗岩岩浆。而比较合理的模型是低速层是由岩石中含有隙间

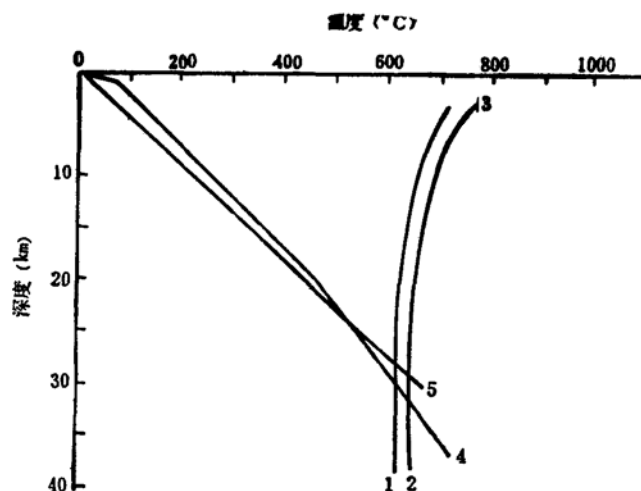


图 5 现代地温与花岗岩固相线

Fig. 5 Present geotherm and granite solius

固相线: 1—花岗岩-H₂O; 2—英云闪长岩-H₂O; 3—冀东黑云母片麻岩-H₂O
冀东现代地温: 4—陈墨香等(1988); 5—吴乾藩等(1985)

的高温水流体相所引起的。对于水流体相是如何形成的, 国内外文献中常常归因于含水矿物的脱水作用。结合冀东陆壳的情况看, 中地壳主要为高角闪岩相的岩石, 形成于 650—750°C, 其顶部有低角闪岩相岩石, 形成于 550—650°C, 这样的岩石如果处于含水条件, 并在现代地温 (约 500°C) 条件下, 一般是不会发生矿物的脱水反应, 而会发生矿物的吸水反应。因此, 水流体可能来源于更深部, 或者部分地来源于向下循环的地表水。

参 考 文 献

- [1] Wyllie, P.J., 1977, From crucibles through subduction to batholiths. In: Saxena, S. K. et al., Ed, Energetics of Geological processes, 389—433, Springer-Verlag.
- [2] Merrill, R.B. et al., 1970, Melting reactions in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O to 20 kilobars compared with results for other feldspar-quartz-H₂O and rock-H₂O systems. Jour. Geology, Vol. 78, 558—569.
- [3] Piwinski, A.J. and Wyllie, P.J., 1968, Experimental studies of igneous rock series: a zoned pluton in the Wallowa Batholith, Oregon. J. Geol., 76, 205—234.
- [4] Burnham, C. W., 1979, the importance of volatile constituents: In the Evolution of the Igneous Rocks, Princeton University Press. 439—453.
- [5] Wiukler, H. G. F., 1976, Petrogenesis of metamorphic rocks, 4th edition, Springer Verlag, Berlin. P. 334.

Melting Experiment of Biotite Gneiss—H₂O System at 0.1–0.2 GPa Pressures

Wu Zongxu

(Institute of Geology, State Seismological Bureau)

P. J. Wyllie

(Division of Geological and Planetary Sciences, California
Institute of Technology, USA)

Key words: eastern Hebei Province; biotite gneiss; melting experiment; migmatization; crustal low-velocity layer

Abstract

This paper presents the phase relationships in the biotite gneiss—H₂O system by melting experiment at 0.1–0.2 GPa pressures. The solidus temperatures are 762°C at 0.1 GPa and 712°C at 0.2 GPa. The biotite-out temperatures are 787°C at 0.1 GPa and 737°C at 0.2 GPa, while the Quartz-out temperatures are 837°C at 0.1 GPa and 787°C at 0.2 GPa. Using Burnham model (1979), the estimated H₂O-solubility of the biotite gneiss melt at liquidus temperature is 3.8% at 0.1 GPa and 5.8% at 0.2 GPa. Based on the results of the melting experiment and the paleogeotherm of the early Precambrian continental crust in eastern Hebei Province, the widespread migmatization of the early Precambrian amphibolite facies rocks in the region may result mainly from the partial melting of the crustal rocks (biotite gneiss). The experiment results and the present geotherm in this region suggest that the crustal low-velocity layer may result from the presence of interstitial hydrous fluids rather than the partial melting.