

大别山北部石榴二辉麻粒岩变质结构和水活度及其演化特征

苏文^{1,2} 徐树桐¹ 江来利¹ 刘贻灿¹ 吴维平¹

(1. 安徽地质调查院, 合肥 230001; 2. 南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 通过对大别山北部石榴二辉麻粒岩岩相学、矿物地质温压计和热力学计算, 获得4个主要的变质演化阶段的矿物共生组合、温压条件和相应的水活度条件: (1) 榴辉岩相阶段(M₁), 以Cpx(含Jd)+Q+Ru+Gt组合为代表的残留矿物, 并呈包体的形式产于石榴石中, $t=612\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2) 麻粒岩相阶段(M₂), 以Opx+Cpx+Gt+Q+Ti+Mt矿物组合为特征, 其相应的 $t=837\sim 887\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=1.03\sim 1.25\text{ GPa}$, 水活度为0.718~0.799; (3) 角闪岩相阶段(M₃), 矿物组合为Cpx+Gt+Amp+Pl+Mt, $t=530\sim 660\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=0.85\sim 0.95\text{ GPa}$, 其相应的水活度为0.23~0.24; 和(4) 低角闪岩相阶段(M₄), 其形成的温压条件为 $t=495\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=0.56\sim 0.70\text{ GPa}$, 相应的水活度为0.11~0.13. 石榴二辉麻粒岩变质反应、变质结构、矿物组合及其演化, 不仅受控于形成时的温压条件, 而且与形成时体系中水活度的演化有着密切的成因关系. 水活度的演化特征表明, 变质流体在变质作用过程中, 对变质反应温度起着一定的缓冲作用.

关键词: 变质结构; 变质反应; 水活度; 麻粒岩; 大别山.

中图分类号: P588.34 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2000)02-0152-07

作者简介: 苏文, 女, 1962年生, 博士研究生, 主要研究方向为变质岩石学及显微构造.

变质岩中的变质结构、变质反应、矿物组合演化及其与流体演化相互之间关系, 可用来推导变质作用的温度-压力矢量, 进而揭示一个变质体的演化历史. 大别山区的高压变质岩与麻粒岩的研究一直为地学工作者所关注. 大量的研究表明, 大别山部分高压变质岩在其后抬升过程中, 经历了麻粒岩相、角闪岩相、绿片岩相的退变质作用^[1~5], 有的麻粒岩变质可能与高压变质同步^[4].

大别山北部石榴二辉麻粒岩中保存了多期变质结构及其相应的变质反应序列, 记录了岩石在变质变形演化过程中温压变化、成分变异、流体的参与及其与水活度演化特征. 本文试图通过大别山北部石榴二辉麻粒岩的变质结构及变质反应来划分变质作用阶段, 并通过各阶段的变质反应来计算其水活度, 进而研究其变质作用和流体的演化特征, 在此基础上, 探讨其动力学意义.

1 石榴二辉麻粒岩分布和岩相学特征

石榴二辉麻粒岩主要出露于大别山北部的霍山县姜河、抱儿山及扬崖一带, 常呈岩块状或小透镜体分布于角闪岩相的片麻岩中. 由于后期构造环境的改变使这些片麻岩受到了强烈而广泛的剪切作用, 形成了不同类型的糜棱岩带, 使得这些石榴二辉麻粒岩岩块如同放大的碎斑成为基质构造包裹体.

石榴二辉麻粒岩的主要矿物为石榴石(20%~30%)、斜方辉石(10%~15%)、单斜辉石(10%~15%)、斜长石(20%~25%)、角闪石(5%~10%)、钾长石(1%~5%)、石英(5%~15%)和少量的伴生矿物金红石、榍石、磁铁矿及钛铁矿等. 岩石发育后成合晶及冠状体结构, 约有10%~30%的单斜辉石由细粒的斜长石、石英、单斜辉石及角闪石构成后成合晶假象; 约有5%~10%的石榴石+单斜辉石经退变质反应形成了冠状体结构, 有的反应进行得非常彻底. 石榴石变斑晶粒度一般大于2.5 mm, 常呈港湾状或岛状, 晶内裂隙发育, 有时则沿着石榴石晶

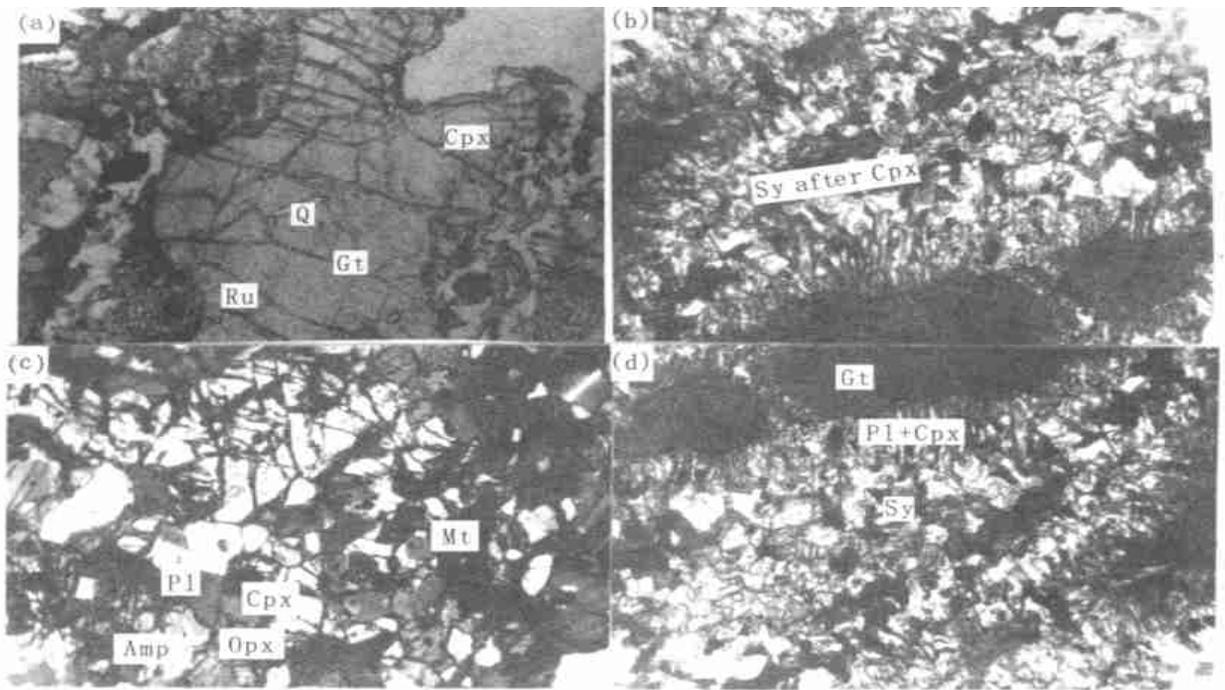


图1 大别山北部石榴二辉麻粒岩显微照片(样品号:881067)

Fig. 1 Micrographs showing mineral parageneses and metamorphic textures of pyrigarnite in northern Dabie Mountains

- a. 石榴石中含有 Ru, Q, Cpx 等包体;单偏光, $\times 100$; b. 单斜辉石退变成 Cpx + Amp + Pl 的后成合晶,但仍可见其外形;正交偏光, $\times 100$;
c. 岩石中的 Opx + Cpx + Amp + Pl 的平衡共生;单偏光, $\times 160$; d. 石榴石冠状体结构由内带和外带组成;单偏光, $\times 200$

内的裂隙发育而形成后成合晶,石榴石中含有石英、金红石、单斜辉石等包体(图 1a)。斜方辉石薄片镜下呈粉红色,具有明显的多色性,根据其产出结构特征可划分为两世代:第一世代具有微弱粉红多色性,呈不规则形态,粒度为 0.2~0.5 mm,晶内发育有解理及出溶的叶理结构;第二世代的斜方辉石则呈蠕虫状结构产于后成合晶中。单斜辉石按其产状,主要有两种:一种呈包体赋存在石榴石中,并且边部已经退变为透辉石与斜长石的反应边;另一种则在基质中,但早期的单斜辉石均已退变,通过观察,其分解主要通过 2 种方式:(1)与石榴石相互反应,形成石榴石的后成合晶冠状体;(2)退变成具单斜辉石假象的细粒单斜辉石 + 斜长石 + 角闪石后成合晶(图 1b)。角闪石有两个生成阶段:(1)呈他形粒状变晶,具有解理,与斜方辉石、单斜辉石及斜长石呈多边粒状变晶结构共生(图 1c);(2)退变质作用晚期形成的角闪石,呈黄绿色,细粒结构,与斜长石共生构成石榴石边缘的后成合晶。斜长石则为早期矿物退变质分解的产物,呈他形及细粒出现在单斜辉石或石榴石的后成合晶或冠状体结构中。

2 变质反应结构与变质反应

石榴二辉麻粒岩中突出的变质反应结构是斜长石、斜方辉石、单斜辉石等矿物构成的后成合晶冠状体。冠状体分外带和内带两个部分:外带(0.1 mm 宽)主要由斜方辉石 + 单斜辉石 + 斜长石 + 角闪石组成,内带(0.4 mm 宽)分别由非常细粒的斜长石 + 单斜辉石 + 角闪石和细粒的后成合晶构成(图 1d)。

2.1 矿物学特征

(1)石榴石。通常具有微弱的成分环带,从核部至边部, MgO, MnO 逐渐增高,而 FeO, CaO 逐渐降低;其端元组分的变化,从核部到边缘为:Pyrr 质量分数从 21% 逐渐增高到 26.44%, Alm 则从 44% 逐渐下降到 40.04%。(2)斜方辉石。两个世代的斜方辉石化学成分差别不明显,且 $X_{Mg}^{Opx} = w(Mg)/w(Mg+Fe)$, 在 0.539~0.553 之间,按 Deer 等^[6]的分类原则均属于紫苏辉石。(3)单斜辉石。产于石榴石中的包体单斜辉石 Na₂O 质量分数 1.96%(见表 1),硬玉的端元组分为 8.40%。后成合晶或冠状体的单斜辉石大多数属于次透辉石(或铁质透辉石),少数为普通辉石或介于二者之间的成分, $w(MgO) =$

表 1 大别山北部石榴二辉麻粒岩代表性矿物电子探针分析

Table 1 Electron microprobe analysis of representative minerals in pyrrgamite from northern Dabie Mountains

矿物	石榴石				单斜辉石				斜方辉石				角闪石				斜长石			
	核部	中部	边部	包体	合晶中	冠状体	合晶中	冠状体	合晶中	冠状体	合晶中	冠状体	合晶中	冠状体	合晶中	冠状体	合晶中	冠状体		
SiO ₂	38.23	38.00	39.97	51.30	51.60	52.51	52.39	52.14	51.61	51.59	51.63	44.30	40.31	45.68	65.97	61.02	57.99	46.00		
TiO ₂	0.09	0.04	0.01	0.18	0.33	0.26	0.27	0.31	0.06	0.00	0.00	0.51	4.78	0.63	0.01	0.00	0.00	0.03		
Al ₂ O ₃	21.81	22.49	23.27	6.54	2.16	2.32	1.89	1.81	1.06	1.29	1.39	10.12	14.58	11.55	20.28	26.02	27.04	34.84		
FeO	21.05	20.76	18.57	5.05	9.62	9.48	9.69	9.37	26.77	27.61	27.47	13.01	10.22	14.49	0.22	0.00	0.00	0.32		
MnO	0.01	0.21	0.24	0.08	0.00	0.11	0.18	0.20	0.51	0.45	0.26	0.13	0.07	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00		
MgO	5.02	6.36	6.88	12.96	13.16	12.72	13.41	13.03	18.62	18.07	18.62	13.38	13.23	13.55	0.01	0.00	0.00	0.00		
CaO	12.75	12.35	11.93	22.05	22.07	22.09	22.37	22.05	0.53	0.60	0.50	10.97	9.98	10.42	1.97	4.26	8.83	17.12		
Na ₂ O	0.05	0.01	0.01	1.96	0.56	0.42	0.39	0.41	0.01	0.03	0.01	3.01	2.63	1.61	10.98	8.68	6.27	1.67		
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	1.94	0.32	0.02	0.00	0.12	0.05		
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.16	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	-	-	-	-		
总计	99.01	100.22	100.88	99.92	99.60	99.91	100.59	99.32	100.33	99.64	99.88	95.49	97.74	98.30	99.47	100.18	100.25	100.03		
O	12	12	12	6	6	6	6	6	6	6	6	22	22	22	8	8	8	8		
Si	2.974	2.901	3.011	1.868	1.931	1.965	1.944	1.961	1.966	1.980	1.971	6.663	5.889	6.646	2.919	2.697	2.586	2.116		
Ti	0.005	0.002	0.001	0.005	0.009	0.007	0.008	0.009	0.002	0.000	0.000	0.058	0.525	0.690	0.000	0.000	0.000	0.001		
Al	1.998	2.022	2.065	0.280	0.095	0.102	0.083	0.080	0.048	0.058	0.063	1.793	2.509	1.979	1.057	1.354	1.420	1.887		
Fe ²⁺	1.369	1.325	1.170	0.154	0.901	0.296	0.301	0.292	0.853	0.886	0.877	1.637	1.249	1.763	0.008	0.000	0.000	0.012		
Mn	0.001	0.014	0.015	0.002	0.003	0.003	0.006	0.006	0.16	0.015	0.008	0.017	0.009	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000		
Mg	0.582	0.724	0.773	0.692	0.734	0.710	0.742	0.731	1.057	1.034	1.059	3.000	2.882	2.939	0.001	0.000	0.000	0.000		
Ca	1.063	1.010	0.963	0.860	0.885	0.886	0.889	0.889	0.022	0.025	0.020	1.768	1.562	1.625	0.093	0.202	0.422	0.844		
Na	0.008	0.001	0.001	0.138	0.041	0.003	0.028	0.030	0.001	0.002	0.001	0.878	0.735	0.454	0.942	0.744	0.542	0.149		
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.362	0.059	0.001	0.000	0.007	0.003		
Cr	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.000	0.000	0.000	0.099	0.000	-	-	-	-		
总计	8.000	8.000	8.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	15.825	15.831	15.549	5.021	4.997	4.977	5.012		

样品号 881067. 电子探针分析由南京大学成矿作用国家重点开放实验室电子探针室完成, 仪器型号为 JXA-8800M Electronprobe Microanalyzer.

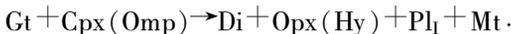
12.72%~13.41%, $w(\text{FeO}) = 9.37\% \sim 9.69\%$, $w(\text{CaO}) = 22.05\% \sim 22.37\%$. 单斜辉石中的 $w(\text{Mg})/w(\text{Fe})$ 比值与寄主岩石 $w(\text{MgO})/w(\text{FeO})$ 比值大致呈正相关关系, 表明单斜辉石的 $w(\text{Mg})/w(\text{Fe})$ 比值主要受寄主岩石的化学成分控制. (4) 角闪石. 根据 Leake^[7] 的分类方案, 后成合晶和冠状体的角闪石均为富钙的角闪石. (5) 斜长石. 其化学成分变化范围较大, 由单斜辉石退变而来的斜长石为钠长石, 其他的斜长石则为拉长石—培长石. (6) 石英. 主要以蠕虫状集合体与斜长石、单斜辉石、角闪石一起出现在早期矿物的后成合晶中; 少数则呈包体的形式产于石榴石中, 大多呈单晶体, 且含有少量流体包裹体.

2.2 矿物组合及其变质反应序列

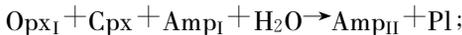
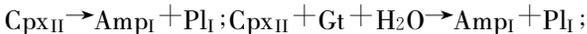
根据石榴二辉麻粒岩变质过程中结构特征及其矿物共生关系, 可以鉴别出 4 个世代矿物组合.

第一世代矿物组合 (M_1) 为: 石英+金红石+石榴石+单斜辉石(含硬玉组分), 它们可能代表了此类岩石曾经历过榴辉岩相的变质作用. 其相应的矿物转变反应为: $\text{Cpx}_I(\text{含 Jd}) \rightarrow \text{Cpx}_{II}(\text{Di}) + \text{Pl}_I$.

第二世代的矿物组合 (M_2) 为: 透辉石+石榴石+斜长石+角闪石+斜方辉石, 其典型的结构为单斜辉石后成合晶和石榴石的冠状体结构的形成以及紫苏辉石的出现, 表明岩石已经进入了麻粒岩相的变质作用阶段, 其相应的反应序列为:



第三世代的矿物组合 (M_3) 为: 石英+角闪石+斜长石+磁铁矿, 其典型的结构表现为后成合晶中的矿物晶体的生长, 且形成了多边粒状变晶结构(角闪石、斜长石和单斜辉石), 表明此时岩石已经退变为角闪岩相. 其相应的退变反应为:



第四世代的矿物组合 (M_4) 为: 石英+角闪石+斜长石, 这主要表现为角闪石的成分分带以及演化关系. 其相应的反应为: $\text{Amp}_{II} + \text{Q} \rightarrow \text{Amp}_{III} + \text{Pl}_{III}$.

3 温压计算

根据各变质阶段平衡矿物共生组合, 采用了适合本区地质温压计的计算方法, 其结果列于表 2.

表 2 大别山北部石榴二辉麻粒岩变质温压条件计算结果

Table 2 Metamorphic temperature and pressure of pyrigarnite in northern Dabie Mountains

变质阶段	典型矿物组合	矿物对	计算方法	$t/^\circ\text{C}$	p/GPa
M_1	$\text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Q} + \text{Ru}$	$\text{Cpx} - \text{Gt}$	文献[8]	750	假定为 2.8
			文献[9]	737	假定为 2.8
			文献[10]	612	假定为 2.8
M_2	$\text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Q} + \text{Pl}$	$\text{Opx} - \text{Cpx}$	文献[11]	887	
			文献[12]	845	
			文献[13]		1.25
			文献[14]	838	1.10
			文献[15]	850	$(p_{\text{Fe}})1.03$ $(p_{\text{Mg}})1.15$
M_3	$\text{Gt} + \text{Cpx} + \text{Amp} + \text{Q} + \text{Ti} + \text{Mt}$	$\text{Amp} - \text{Pl}$ Amp 中的 Al	文献[16]	530	0.89
			文献[17]	660	0.89
			文献[18]		0.95
			文献[19]		0.90
M_4	$\text{Amp} + \text{Pl} + \text{Q} + \text{Mt}$	$\text{Amp} - \text{Pl}$ Amp 中的 Al	文献[16]	495	0.62
			文献[18]		0.58~0.65
			文献[19]		0.56~0.70

表 3 不同变质阶段矿物的水活度计算结果

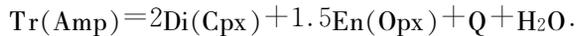
Table 3 Values of water activities of different metamorphic stages

变质阶段	$t/^\circ\text{C}$	p/GPa	$a_{\text{H}_2\text{O}}$
M_2	837~850	1.03~1.25	0.718~0.799
M_3	530	0.85~0.90	0.23~0.24
M_4	495	0.56~0.70	0.11~0.13

4 水活度计算

本文采用各变质阶段矿物的脱水平衡反应来进行计算, 其计算结果列于表 3.

本区的石榴二辉麻粒岩在麻粒岩相阶段 (M_2) 的主要矿物组合为 $\text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Pl} + \text{Q} + \text{Amp}$, 而其后的退变质阶段 (M_3) 的典型矿物组合为 $\text{Amp} + \text{Pl} + \text{Cpx} + \text{Mt}$, 所以, M_2, M_3 阶段的水活度可以通过下列的脱水反应来计算:



式中: Tr, Di, En 分别代表角闪石、单斜辉石、斜方辉石中的透闪石、透辉石和顽火辉石的端元组分. 根据 Spear^[20] 用实验回归得到的变质反应化学位差公式, 计算反应的化学位的变化:

$$\Delta\mu^0 = 29442 - 39.501T - 0.572p.$$

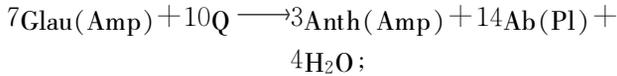
上述平衡的热力学方程为:

$$\Delta\mu^0 + RT \ln K_D + RT \ln a_{\text{H}_2\text{O}} = 0.$$

其中的平衡常数 $K_D = (a_{\text{Di}}^{\text{Cpx}})^2 (a_{\text{En}}^{\text{Opx}})^{1.5} / (a_{\text{Tr}}^{\text{Amp}})$.

($\alpha_{\text{SiO}_2}^0$), $\alpha_{\text{Di}}^{\text{Cpx}}$ 和 $\alpha_{\text{En}}^{\text{Opx}}$ 采用 Wood 等^[12]活度模式, $\alpha_{\text{Tr}}^{\text{Amp}}$ 则采用 Triboulet^[21]的活度模式进行计算. 通过对上述 2 个方程的求解, 其结果见表 3.

M_4 为晚期的退变质阶段, 其水活度主要根据角闪石的退变质反应来进行计算, 反应式为:



式中的 Glau, Anth, Ab 分别代表角闪石中的蓝闪石、镁铁闪石和斜长石中的钠长石的端元组分. 当反应达到平衡时, 可以建立如下的热力学方程:

$$-RT \ln K_D = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 + \Delta V_{298}^0(p-1) + \int_{298}^0 \Delta C_p^0 dT - \int_{298}^0 \Delta C_p^0 / T dT + 4RT \ln(r_{\text{H}_2\text{O}} p \alpha_{\text{H}_2\text{O}}) = 0;$$

式中: ΔH_{298}^0 , ΔS_{298}^0 , ΔV_{298}^0 分别代表反应式在标准状态下的焓变量、熵变量及固体体积的变化量. ΔC_p^0 , $r_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为纯水流体中的热容变量和水的活度系数, R 为气体常数 (8.314). 角闪石端元组分 $\alpha_{\text{Anth}}^{\text{Amp}}$, $\alpha_{\text{Glau}}^{\text{Amp}}$ 活度计算采用 Triboulet^[21]的活度模式, $\alpha_{\text{Ab}}^{\text{Pl}}$ 采用理想固溶体模式. 采用上述公式, 对本区石榴二辉麻粒岩晚期退变质作用形成的角闪石进行水活度的计算, 当 $p=0.56\sim 0.70$ GPa 时, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 0.11~0.13.

通过以上水活度的计算, 可以看出, 本区的石榴二辉麻粒岩水活度有明显的变化规律, 即随着温度的降低, 水活度也明显下降, 表现为麻粒岩相阶段 (M_2) 水活度为 0.718~0.799, 其平均值为 0.758; 而其后的退变质阶段 (M_3-M_4), 体系的水活度从 0.24 下降为 0.11.

5 结论

通过对岩石的变质结构、变质反应及其演化特征的研究, 大别山北部的石榴二辉麻粒岩在变质作用过程中, 主要经历了 4 个变质演化作用阶段. (1) M_1 阶段: 矿物组合为 $\text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Q} + \text{Ru}$, 其相应的变质温度为 612~750 °C, 而早期残留的含硬玉组分的单斜辉石表明本区的石榴二辉麻粒岩曾经历过榴辉岩相阶段; (2) M_2 阶段: 矿物组合为 $\text{Opx} + \text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Amp} + \text{Q} + \text{Ti} + \text{Mt}$, 其相应的变质温度为 837~887 °C, 压力为 1.03~1.25 GPa. 代表此时已经到

达了麻粒岩相的变质作用阶段; (3) M_3 阶段: 矿物组合为 $\text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Amp} + \text{Pl} + \text{Mt}$, 其相应的变质温度为 530~660 °C, 压力为 0.85~0.95 GPa, 代表此时已经进入了角闪岩相的变质作用阶段; (4) M_4 为晚期退变质作用形成的低角闪岩相阶段, 其相应的温度和压力分别为 495 °C 和 0.56~0.70 GPa.

热力学计算结果表明, 本区的石榴二辉麻粒岩水活度流体在整个变质作用过程中具有规律性的变化特征: M_2 阶段水活度最高, 为 0.718~0.799, 至 M_3, M_4 阶段, 其水活度依次降低, 从 0.23~0.24 变到 0.11~0.13, 即水活度随着温度的降低而降低, 这表明变质流体在变质作用过程中, 对变质反应温度存在着一定的缓冲作用.

综上所述, 大别山北部石榴二辉麻粒岩变质反应、矿物组合及其演化特征, 不仅受控于形成时的温压条件, 而且与形成时体系中流体的存在及其水活度的演化有着密切的成因关系. 岩石中形成的变质反应及变质结构可以看作是麻粒岩相从原始的高温高压相向低压相转变的过程中形成的, 这种转变是地壳下部迅速隆起, 并维持一种高的地热梯度发生的.

在成文过程中, 得到了游振东教授、钟增球教授及吴金平教授等的热情帮助和鼓励, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 大别山的构造格局和演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] 徐树桐, 苏文, 刘贻灿, 等. 大别山东段高压变质岩中的金刚石 [J]. 科学通报, 1991, 36(17): 1318~1321.
- [3] You Z D, Han Y J, Yang W R, et al. The high-pressure and ultra-high-pressure metamorphic belt in the east Qinling and Dabie Mountains, China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [4] 从柏林, 王清成, 叶凯. 山东威海含柯石英麻粒岩的发现及其意义 [J]. 科学通报, 1996, 38: 1235~1238.
- [5] Su W, Xu S T, Jiang L L, et al. Coesite from quartz-jadeite in the Dabie Mountains, Eastern China [J]. Mineral Mag, 1996, 60: 229~239.
- [6] Deer W A, Howie R A, Zussman J. Rock-forming minerals (Volume 2A) — single-chain silicates [M]. New York: Longman, 1978.
- [7] Leake B E. Nomenclature of amphibole [J]. Mineral Mag, 1978, 42: 533~563.
- [8] Ellis D J, Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria [J]. Contrib Mineral Petrol, 1979, 71: 13~22.

- [9] Krogh E J. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer — a reinter pretation of existing experimental data [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 99: 44~48.
- [10] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration; the garnet-clinopyroxene geothermometer revised [J]. *J Metamorphic Geo*, 1985, 3: 327~342.
- [11] Wells R D. Pyroxene thermometry in simple and complex systems [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1977, 62: 129~139.
- [12] Wood B J, Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationship in simple and complex systems [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1973, 42: 109~124.
- [13] Harley S L, Green D H. Garnet-orthopyroxene barometry for granulites and peridotites. *Nature*, 1982, 300: 697~701.
- [14] Harley S L. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 86: 359~373.
- [15] Paria P, Bhattacharya A, Sen S K. The reaction garnet + clinopyroxene + quartz = 2orthopyroxene + anorthite; a potential geobarometer for granulites [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 99: 126~133.
- [16] Plyusnina L P. Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1982, 80: 140~146.
- [17] Spear F S. Amphibole-plagioclase equilibria; an empirical model for the relation albite + tremolite + edenite + 4quartz [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1980, 77: 355~364.
- [18] Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, et al. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons [J]. *Amer Mineral*, 1987, 72: 231~239.
- [19] Schmidt M W. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure; an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1992, 110: 304~310.
- [20] Spear F S. An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite [J]. *Amer Jour of Science*, 1981, 281: 697~734.
- [21] Triboulet C I. Controls on p - T - t deformation path from amphibole zonation during progressive metamorphism of basic rocks, Century of the River Vilaine, South Brittany France [J]. *J Metamorphic Geo*, 1988, 6: 117~133.

METAMORPHIC STRUCTURE, WATER ACTIVITIES AND THEIR EVOLUTIONARY FEATURES OF PYRIGARNITE, NORTH OF DABIE MOUNTAINS, EAST OF CHINA

Su Wen^{1,2} Xu Shutong¹ Jiang Laili¹ Liu Yican¹ Wu Weiping¹

(1. *Anhui Institute of Geology, Hefei 230001, China*; 2. *National Key Laboratory of Mineralization, Nanjing University, Nanjing 210008, China*)

Abstract: The lithofacies research, the calculation of the mineral and geological temperature and pressure, and the thermodynamic calculation are all used in this paper to obtain the mineral association assemblages, the temperature and pressure conditions and the corresponding water activity conditions that occurred in the four major metamorphic evolutionary stages of the pyrigarnite in the Dabie Mountains: (1) The eclogite facies stage (M₁) is characterized by the residual minerals represented by Cpx (jadeite-bearing) + Q + Ru + Gt that occur as inclusions in the garnets at $t=612-750\text{ }^{\circ}\text{C}$. (2) The granulite facies stage (M₂) is featured by the mineral assembly consisting of Opx + Cpx + Amp + Gt + Q + Ti + Mt at $t=837-887\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=1.03-1.25\text{ GPa}$. The water activity in this stage ranges between 0.718-0.799. (3) The amphibolite facies (M₃) is characterized by the mineral assembly consisting of Cpx + Gt + Amp + Pl + Mt at $t=530-660\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $p=0.89-0.95\text{ GPa}$. The water activity in this stage was reduced to 0.23-0.24. (4) The low amphibolite facies (M₄) occurred at $t=495\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $p=0.56-0.70\text{ GPa}$. The water activity in this stage was 0.11-0.13. In conclusion, the metamorphic reaction, the metamorphic structure, the mineral assembly and evo-

lution of the pyrigarnite are not only controlled by the temperature and pressure conditions, but also closely related in cause and effect to the evolution of water activity during its formation system. The evolutionary feature of the water activity shows that the metamorphic fluids may have played a buffering role in the metamorphic reaction temperature during the metamorphic stages.

Key words: metamorphic structure; metamorphic reaction; water activity; granulite; Dabie Mountains.

(上接 132 页)

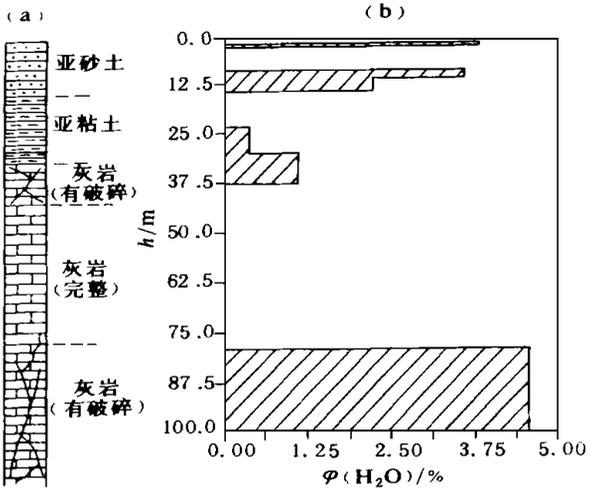


图 3 NMR 解释结果与钻探结果对比

Fig. 3 Comparison between NMR interpretation and drilling result

NMR 测点的勘探范围内, 地下的主要含水层有 4 个, 它们分别位于: 2.0~3.0 m, 9.0~14.5 m, 23.5~38.2 m 和 79.2~100 m. 其中, 前两个含水层为地表潜水, 后两个含水层为承压含水层. 由图 2 可见, 地电断面主要由两个电性层构成, 电阻率为 11~32 Ω·m 的低阻层覆盖在高阻($\rho > 330 \Omega \cdot m$)基岩之上. 基岩的起伏形态如图 2 中所示. 从电测深工作结果看, 后两个含水层处在高阻($\rho > 330 \Omega \cdot m$)基岩中; 联合剖面法工作结果表明, 工作区内无明显的断裂反映.

根据 NMR 测量反演结果并结合电法资料解释结果, 认为测点所在部位赋存有具开采价值的地下水, 孔隙较大, 连通性好, 类型为高阻基岩中含水. 建议布置钻探验证, 设计孔深 120 m, 钻探目的层在 30~40 m 和 100 m 左右. 经过钻探(终孔深度 130 m)证实, 在 33~42 m 深度和 77~130 m 深度见石炭系、二叠系灰岩、白云质灰岩, 岩心中可见溶洞和裂隙发育, 含水性及连通情况均好(图 3), 单井日出水

量超过 1 000 t, 并且水质较好^[3], 证实了 NMR 方法的找水效果.

4 结论

(1)NMR 方法的工作结果, 可以给出地下是否含有水的结论, 有水则 NMR 信号就有反映; 可以给出勘探深度内地下含水层的分布及相应的含水量的大小(体积百分比); 可以给出含水层孔隙度大小的概念. (2)NMR 方法是目前唯一能直接探测地下水的物探方法, 具有分辨力高、效率高、信息量丰富和解的唯一性等优点, 勘探投资少、见效快, 可以不打钻或少打钻, 大量减少价格昂贵的钻探工作量. (3) 由于核磁共振找水仪器的灵敏度高, 所以测量的 NMR 信号容易受到电磁干扰的影响, 但是, 在噪声水平比较高的情况下, 只要能满足仪器观测容忍度($< 1 500 \text{ nV}$)的要求, 适当增加叠加次数, 仍可取得令人满意的效果. 从实际应用结果看, 引进的这台仪器勘探深度可达 120~130 m; 若要加大勘探深度, 可采取的办法是增加线圈长度和加大激发电流的强度. (4)NMR 方法可以用来进行区域性水文地质调查, 确定找水远景区; 圈定各种类型的地下水在三维空间的分布, 为寻找工农业用水、生活用水、选定水井位置提供可靠的信息. NMR 方法除了可以直接探测地下淡水以外, 与瞬变电磁法结合, 还可以圈定污染水范围、了解污染程度, 在环境保护、大坝地下水潜水平的监测等方面起到积极作用.

参考文献

[1] 潘玉玲, 李振宇, 尹成勇. 核磁共振测井及找水综述[J]. 物探化探译丛, 1997, (5): 12~19.
 [2] 董浩斌, 袁照令, 李振宇, 等. 核磁共振找水方法在河南某地的试验结果[J]. 物探与化探, 1998, 22(5): 343~347.
 [3] 袁照令, 董浩斌. 核磁共振找水法应用成功[N]. 湖北科技报, 1998-10-02(1).