阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据

张建新 杨经绥 许志琴 孟繁聪 宋述光 李海兵 史仁灯

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037. E-mail: zjx66@yeah.net)

摘要 阿尔金榴辉岩中石榴石具有大量特征结构的多晶石英包体, 显示了峰期条件下柯石英存在的可能性. 榴辉岩中绿辉石和磷灰石矿物中的出熔结构以及含多硅白云母榴辉岩的温度、压力计算, 为阿尔金榴辉岩中超高压变质作用的存在提供了进一步的证据. 结合在柴北缘地区榴辉岩围岩中柯石英的确定, 确定在中国西部存在一条被巨型走滑断裂(阿尔金断裂)所切割的超高压变质带.

关键词 阿尔金 榴辉岩 超高压变质作用

超高压变质作用是在柯石英稳定条件下进行的榴辉岩相变质作用[1], 因而柯石英的存在与否被一些学者作为超高压(UHP)变质作用的主要标志甚至是惟一的标志. 柯石英最早发现于西阿尔卑斯的变质沉积岩和挪威西部的榴辉岩中[2,3], 中国的大别山是世界上第 3 个发现柯石英的超高压变质带[4]. 此后, 在欧亚大陆的许多碰撞造山带和非洲又厘定出一些超高压变质带, 在一些地区还发现了金刚石. 到目前为止, 世界上已经确证的超高压变质地体多达 14 个[5, 6].

然而, 柯石英的保存条件十分苛刻, 流体和退变质作用等因素均很容易使柯石英转变成石英, 在没有柯石英残晶保存的情况下, 多晶石英和具有栅状结构的石英集合体被认为是柯石英的假象, 是柯石英曾存在的证据, 并作为一些造山带 UHP 变质作用存在的主要依据. 如在欧洲华力西造山带中德国的 Saxonian Erzgebrige 地区、波兰的 Snieznik Mountains 地区、俄罗斯南乌拉尔的 Maksyutov 杂岩带、哈萨克斯坦天山的 Makbal 和 Atbashy 地区等. 在没有发现柯石英保存的情况下, 石榴石等矿物中的具有特征结构的多晶石英集合体包体被作为 UHP 变质作用存在的主要依据[6~9]. 同时, 随着对超高压变质作用研究的不断深入, 人们发现在缺乏柯石英和具有特征结构的多晶石英的条件下, 一些岩相学、矿物组合、矿物化学甚至温度、压力的估算, 可作为判断超高压变质作用的重要标志. 如绿辉石中一定量的 K_2O 含量, 石榴石中一定量的 Na_2O 含量等均可作为判定超高压变质作用的辅助标志[5].

近年来, 在中国西部的阿尔金及柴北缘的不同地区, 先后发现有榴辉岩出露[10~17]. 与世界上许多高压-超高压(HP-UHP)变质带相似, 这些榴辉岩均呈透镜状分布在长英质片麻岩(正、副片麻岩)中, 因而在榴辉岩及相关岩石中寻找 UHP 变质作用的证据成为人们竞相研究的目标. 最近, 通过对锆石中包体矿物的研究, 在柴北缘都兰地区的榴辉岩的片麻岩围岩中发现了柯石英[18]; 与此同时, 在阿尔金榴辉岩中, 我们发现了具有特征结构的多晶石英包体, 并且同一榴辉岩中还具有绿辉石中出熔的石英片晶、磷灰石中出熔的未知成分片晶等 UHP 变质岩石的显微结构特征. 根据矿物反应的温度和压力计算, 显示其峰期条件也在柯石英稳定范围内, 这些证据反映了阿尔金榴辉岩经历了 UHP 变质作用.

1 阿尔金榴辉岩的基本特征

阿尔金山中的榴辉岩最早发现于阿尔金构造带的西段[10], 就目前所掌握的资料, 榴辉岩带分布应在且末地区的玉石矿沟——江尕勒萨依沟-米兰河上游一带, 长 200 余公里, 走向近东西向, 在东端被阿尔金断裂所切割[11,16]. 榴辉岩主要呈透镜状或布丁状产于片麻岩之中, 其透镜体的长轴与片麻岩的片麻理走向一致. 这些片麻岩主要包括含石榴石的长英质片麻岩、含石榴石的斜长角闪片麻岩等. 片麻岩总体上显示出角闪岩相的矿物组合, 局部也可能达到高角闪岩相甚至麻粒岩相, 到目前为止, 还没有高压矿物组合的残留发现.

本项研究的榴辉岩样取自新疆且末江尕勒萨依沟, 露头上仅见强退变榴辉岩呈透镜状或布丁状产于含夕线石榴二长片麻岩之中, 而新鲜榴辉岩主要呈滚石分布在江尕勒萨依沟中. 新鲜榴辉岩的主要矿物组成为石榴石(40%~45%), 绿辉石(30%~35%)、金红石(5%)、多硅白云母(<5%)和石英(<5%), 另含有少量磷灰石和锆石. 绿辉石的硬玉分子含量为 32%~37%(摩尔分数); 石榴石的成分为: Prp 28~32, Alm

41~43, Gro 31~32, Sps 0.8~1.0(本文的矿物英文缩写据文献[19]); 多硅白云母的硅原子数为 6.82~6.96(基于 22 个氧原子). 而大多数榴辉岩遭受到不同程度的退变质作用, 在绿辉石边部形成较低 Na 的单斜辉石和斜长石组成的蠕虫状或网格状后成合晶. 强退变榴辉岩的绿辉石几乎全部被后成合晶所替代, 而石榴石具有 Cpx + Pl ± Amp 所组成的冠状体, 多硅白云母不同程度地被 Bt + Pl 后成合晶所替代, 金红石发育钛铁矿环边. 代表性矿物成分见表 1.

表 1 阿尔金含多硅白云母榴辉岩的代表性矿物成分 a)

样品号	97A12-1			97A12-5		
矿物	Grt	Omp	Phe	Grt	Omp	Phe
SiO_2	39.32	54.36	53.91	40.50	55.85	50.93
TiO_2	0.03	0.12	0.08	0.08	0.17	0.69
Al_2O_3	21.78	8.67	27.79	22.84	8.81	25.99
Cr_2O_3	0.04	0.00	0.03	0.00	0.05	0.08
FeO	20.74	6.04	2.12	19.12	4.89	2.05
MnO	0.38	0.02	0.04	0.44	0.00	0.08
MgO	7.24	9.20	3.46	8.26	9.40	4.24
CaO	10.46	15.80	0.01	10.08	15.39	0.03
Na_2O	0.00	5.26	0.15	0.00	5.12	0.68
K_2O	0.00	0.00	8.24	0.00	0.00	10.13
合计	99.98	99.47	96.63	101.34	99.68	94.90
Si	3.005	1.967	6.948	3.029	2.014	6.824
Ti	0.002	0.003	0.085	0.005	0.005	0.070
Al	1.960	0.369	4.218	2.014	0.374	4.101
Cr	0.002	0.000	0.003	0.000	0.001	0.009
Fe^{3+}	0.019	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe^{2+}	1.307	0.150	0.229	1.196	0.147	0.229
Mn	0.025	0.001	0.004	0.028	0.000	0.009
Mg	0.825	0.496	0.665	0.921	0.505	0.864
Ca	0.856	0.612	0.001	0.808	0.595	0.005
Na	0.000	0.369	0.037	0.000	0.358	0.175
K	0.000	0.000	1.355	0.000	0.000	1.732
合计	8.000	4.000	13.545	8.001	4.000	14.000

a) 样品 97A12-1 的矿物化学分析在中国地质大学(武汉)测试中心电子探针实验室 JEOL-733 型电子探针上进行; 样品 97A12-5 在中国科学院地质与地球物理所 CAME-CAUSX-51 型探针上完成, 分析条件均为 15 kV 加速电压, 20 nA 电子束

2 多晶石英包体及其岩相学特征

多晶石英包体出现在具有较大石榴石颗粒(2 mm 左右)的榴辉岩中, 在这些石榴石中, 除了石英包体外, 还具有绿辉石、多硅白云母、金红石、磷灰石和锆石的包体. 多晶体包体在石榴石中形成很好的放射状裂隙(图 1), 并且一些多晶石英显示出从中心向外放射状分布, 显示出不明显的栅状结构(palisade structure)特征(图 1(e)), 而大多数则显示出镶嵌结构(mosaic texture)特征(图 1(a), (c), (f)). 背散射图像(图 1(b)和(d))显示这些多晶体包体除石英外, 还具有少量的钾长石. 这些多晶石英集合体在石榴石中分布有一定的规律, 它们主要分布在核部和边部之间(幔部). 多晶石英集合体主要呈椭圆形, 少量的呈圆形及长方形. 其中长方形的多晶石英包体由较少的石英集合体所组成(称为 multicrystalline quartz aggregate, 而不同于 polycrystalline quartz aggregate), 这种形态的包体被认为是石英代替柯石英的典型特征. 类似这些特征的多晶石英集合体广泛出现在阿尔卑斯、挪威加里东带和中国大别苏鲁等典型 UHP 变质带, 被认为是先期柯石英存在的证据. 并且在欧洲华力西带, 在没有柯石英残晶保存的情况下, 这种多晶石英结构曾被作为世界上第 4 个 UHP 变质带发现的主要证据[7,8]. 在同一榴辉岩中, 绿辉石中具有针状的石英出熔结构, 在磷灰石中具有针状的未知成分的晶体的出熔现象等主要在 UHP 变质岩中出现的岩相学特征. 尽管这些出熔结构是否能作为 UHP 变质作用的证据尚无定论, 但大量的研究表明这些出熔结构主要发育于世界上典型的 UHP 变质岩石中[20~24]. 最近的一些研究显示[23,24], 单斜辉石中的 SiO_2 中的出熔片晶被认为是 UHP 条件下的含 Ca-Eskola($Ca_{0.5}$-$AlSi_2O_6$)组分的超硅单斜辉石在降压过程中分解的产物. 因此, 到目前为止, 虽然在阿尔金榴辉岩及相关岩石中还没有柯石英残晶体存在的证据, 但从已有的证据可以认为阿尔金榴辉岩峰期变质的压力条件曾稳定在 UHP 变质条件范围内.

3 峰期变质的温度和压力估算

利用 Grt-Cpx 地质温度计[25], 再根据 Ab = Jd + Qtz 的变质反应压力计[26], 估算其榴辉岩相的变质条件: T = 720~810℃, P >1.5 GPa. 用此方法得到的榴辉岩相的压力只是最小压力, 而不是峰期压力. 进一步利用 Grt-Omp-Phe 压力计[27]及 Grt-Omp 和 Grt-Phe 温度计[25,28], 得到两个样品的温度、压力条件分别为: T = 730℃, P = 2.8 GPa(样品 97A12-5)和 T = 820~850℃, P = 2.9~3.0 GPa(图 2), 这种温度、压力条件已在柯石英的稳定范围内. 一些学者认为, 在含多硅白云母榴辉岩中, 在缺乏柯石英的情况下, Grt-Omp-Phe 的估算结果可作为判断是高压(HP)还是 UHP 榴辉岩的依据[5, 29].

4 讨论及意义

以上岩相学和温度、压力估算的证据, 显示阿尔金榴辉岩曾经历过 UHP 变质作用. 但由于阿尔金地区自然条件限制, 研究程度很差, 目前还不能确定 UHP 岩石的分布范围, 进一步在榴辉岩特别是在榴

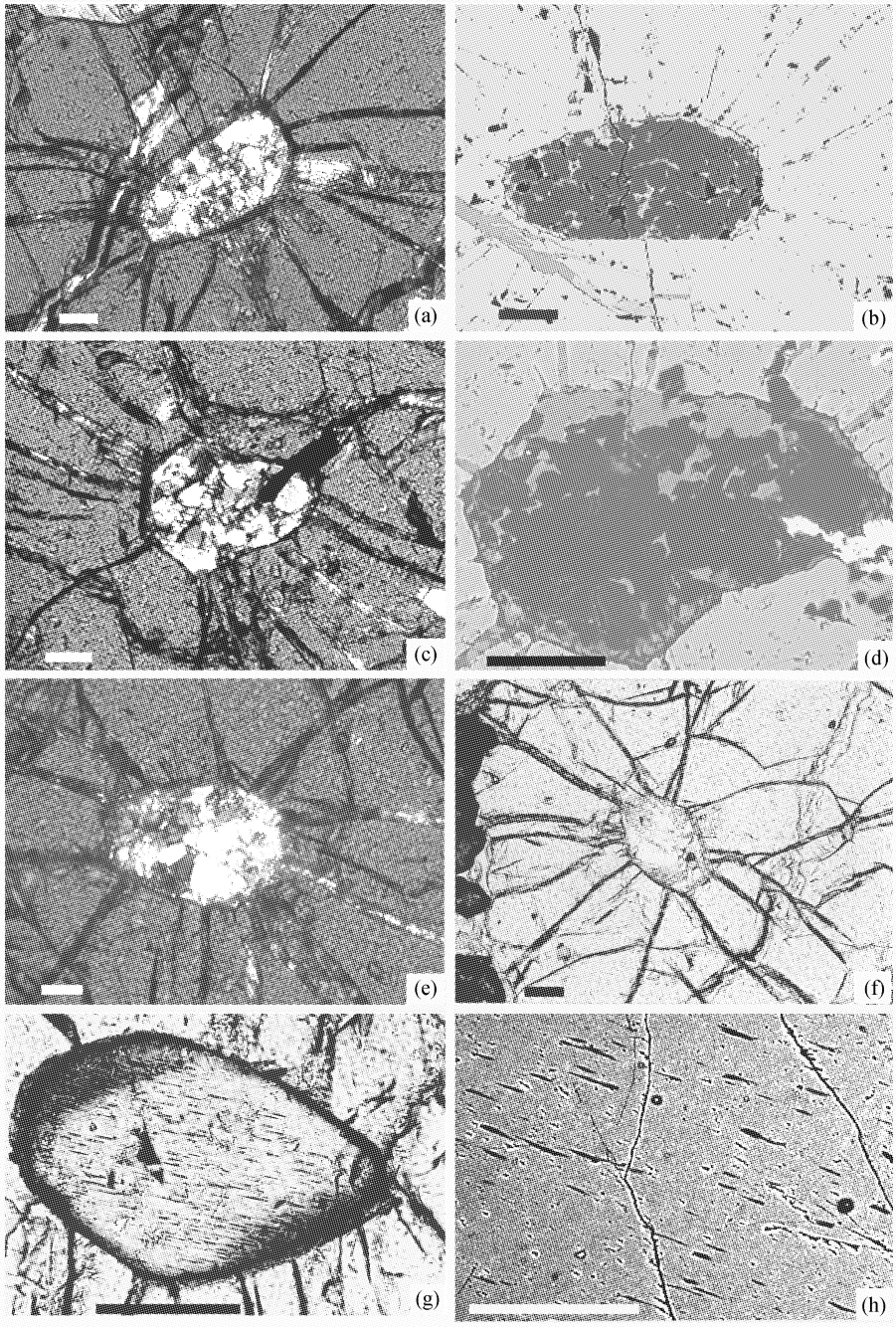

图 1 榴辉岩中石榴石的多晶石英包体及出熔结构

(a)~(e) 石榴石中的多晶石英包体, 主晶石榴石发育以包体为中心的放射状裂隙, 其中(a), (c), (e)为不完全的正交偏光显微照片; (f)为单偏光显微照片; (b), (d)为背散射图像, 其中暗色为石英, 灰色为钾长石; (g) 磷灰石中未知成分的出熔片晶(偏光显微镜照片); (f) 绿辉石中石英出熔片晶(背散射图像). 图中的比例尺标记为 50 μm

辉岩的片麻岩围岩中寻找 UHP 变质作用证据是下一步我们研究的重点. 从榴辉岩分布的区域走向来看, 这些榴辉岩近东西向的总体走向与北东东向的阿尔金主断层成一定的交角[10,16], 向东明显被阿尔金走滑断裂所切割. 最近, 在阿尔金走滑断裂的东侧, 杨经绥等人[18]在柴北缘都兰地区的片麻岩锆石包体中发现有柯石英存在, 并在榴辉岩的石榴石中发现了柯石英假象, 这进一步证实了阿尔金和柴北缘属于同一条早古生代的HP-UHP变质带[13,14], 构成了继大别-苏鲁 HP-UHP 变质带之后, 在中国发现的又一

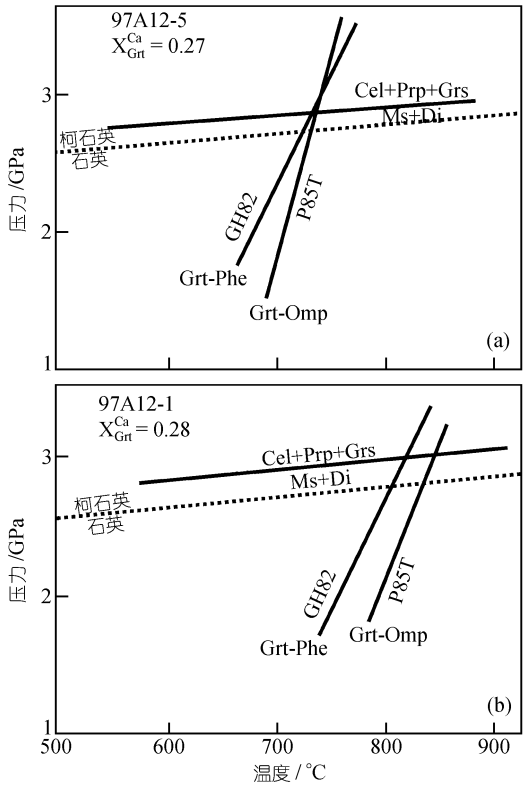

图 2 阿尔金含多硅白云母榴辉岩的 *P-T* 估算

GH82 据文献[28], P85T 据文献[25]; Cel+Prp+Grs 和 Ms+Di 反应线是根据文献[27]提出的 Grt-Omp-Phe 压力计所得; 矿物英文缩写据文献[19]

条被巨型走滑断裂所切割的 HP-UHP 变质带.

致谢 本工作受国家自然科学青年基金(批准号: 49902018)、国家自然科学重点基金(批准号: 49732070)、国家重点基础研究发展规划(G1998040800)及国家地质调查项目(DKD2001003)资助.

参 考 文 献

1 Coleman R G, Wang X. Ultrahigh-pressure metamorphism. New York: Cambridge University Press, 1995. 528
2 Chopin C. Coesite and pure pyrope in high grade blueschists of the Western Alps: A first record and consequences. Contrib Mineral Petrol, 1984, 86: 107~118
3 Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. Nature, 1984, 310: 641~644
4 Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogites from Dabie Mountains, Central China. Geology, 1989, 17: 1085~1088
5 Carswell D A, Zhang R Y. Petrographic characteristics and metamorphic evolution of ultrahigh-pressure eclogites in plate-collision belts. Int Geol Rev, 1999, 41: 781~798
6 Liou J G. Petrotectonic summary of less intensively-studied UHP Regions. Int Geol Rev, 1999, 41: 571~586
7 Schmadicke E. Quartz pseudomorphs after coesite in eclogites from the Saxonian Erzgebirge. Eur J Mineral, 1991, 3: 231~238
8 Schmadicke E, Okrusch M, Schmidt W. Eclogite-facies rocks in the Saxonian Erzgebirge, Germany: High pressure metamorphism under contrasting P-t conditions. Contrib Mineral Petrol, 1992, 110: 226~241
9 Brocker M, Klemd R. Ultrahigh-pressure metamorphism in the Snieznik Mountains (Sudetes, Poland): P-T constraints and Geological implications. The Journal of Geology, 1996, 104: 417~433
10 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义. 科学通报, 1996, 41(14): 1485~1488
11 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质带的特征及其构造意义. 岩石学报, 1999, 15(1): 57~64
12 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义. 科学通报, 1998, 43(14): 1544~1549
13 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 青海都兰地区榴辉岩的发现及对中国中央造山带高压-超高压变质带研究的意义. 地质学报, 2000, 74(2): 156~168
14 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄 —— 阿尔金中加里东期山根存在的证据. 科学通报, 1999, 44(10): 1109~1112
15 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据. 地球化学, 2000, 29(3): 217~222
16 Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. Lithos, 2000, 56(2-3): 189~208
17 张雪亭, 吕惠庆, 陈正兴, 等. 柴北缘造山带沙柳河地区榴辉岩相高压变质岩石的发现及初步研究. 青海地质, 1999, 2: 1~12
18 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物—— 柯石英. 地质学报, 2001, 75(2): 175~179
19 Kretz R. Symbols for rock-forming minerals. Am Mineral, 1983, 68: 277~279
20 Smith D C. Eclogites and Eclogite Facies Rocks. Amsterdam: Elsevier, 1988. 534
21 Zhang R Y, Liou J G. Exsolution lamellae in minerals from ultrahigh-pressure rocks. Int Geol Rev, 1999, 41: 981~993
22 Tsai C O, Liou J G. Eclogite-facies relics and inferred ultrahigh-pressure metamorphism in the North Dabie Complex, central-eastern China. Am Mineral, 2000, 85: 1~8
23 Katayama I, Parkinson C D, Okamoto K, et al. Supersilicic clinopyroxene and silica exsolution in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. Am Mineral, 2000, 85: 1368~1374
24 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
25 Powell R. Regression diagnostic and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer resisited. J Metamorph Geol, 1985, 3: 327~342
26 Holland T J B. The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600~1200℃. Am Mineral, 1980, 65: 129~143
27 Water D J, Martin H N. Geobarometry of phengite-bearing eclogite[abs]. Terra Abs, 1993, 5: 410~411
28 Green D H, Hellman P L. Fe-Mg partitioning between coexisting garnet and phengite at high pressures, and comments on a garnet-phengite at high pressures, and comments on a garnet-phengite geothermometer. Lithos, 1982, 15: 253~266
29 Carswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, et al. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China. J Metamorph Geol, 1997, 15: 239~252

(2001-07-31 收稿, 2001-09-28 收修改稿)