3 王道德, 刘京发, 李肇辉, 等. 中国陨石导论. 北京: 科学出版社, 1993
4 王奎仁. 安徽亳县陨石不透明矿物研究. 矿物学报, 1987, 7(2): 107~ 112
5 王奎仁. 安徽亳县陨石研究. 中国科学, B 辑, 1988(7): 767~ 776
6 王奎仁, 洪吉安, Henry O A M. 天然矿物 wadsleyite 在我国首次发现. 矿物学报, 1995, 15(1): 121~ 125

(1997-09-17 收稿, 1997-12-01 收修改稿)

广东雷州新生代玄武岩中石榴麻粒岩相岩石捕虏体的发现

于津海 方 中 赖鸣远 周新民 罗树文④ 周 旋
(南京大学地球科学系, 南京 210093; ④广东省粤西水文地质大队, 湛江 524033)

摘要 报道了广东雷州英峰岭火山碎屑岩中首次发现的麻粒岩相岩石捕虏体, 其中高压石榴麻粒岩捕虏体在我国极为罕见. 石榴麻粒岩在矿物组成和矿物化学上与辉石麻粒岩有很大的区别. 温压计算显示石榴麻粒岩形成于 1 130~ 1 160 ℃和 1.4~ 1.7 GPa 的高温压条件下, 而二辉麻粒岩形成于 800 ℃左右和 0.65~ 0.8 GPa 的条件下. 高的地温梯度指示新生代本区处于裂谷活动区. 不同组成的麻粒岩是由玄武质岩浆底侵于不同深度形成.

关键词 雷州半岛 捕虏体 石榴石麻粒岩 温压计

新生代玄武岩中的地壳岩石捕虏体是下地壳岩石样品的重要来源, 它是揭示中新生代下地壳组成和壳_幔作用的一个重要窗口. 近年来我国学者已注意到了这一关键领域, 先后在安徽女山[1]、广东麒麟[2]、湖南道县和河北汉诺坝[3]等地发现了一些具重要地质意义的麻粒岩相岩石捕虏体. 这些捕虏体是以镁铁质为主, 最常见的矿物组合是 Cpx+ Opx+ Pl($An_{40\sim 53}$) + oq, 其次是 Opx+ Pl($An_{34\sim 35}$) + Q+ oq ±Kf 和 Cpx+ Pl ($An_{46\sim 49}$) + oq. 温压计算显示它们都形成于高温中、低压的辉石麻粒岩相[1~3]. 本文报道了在广东省雷州半岛新生代火山岩中发现的一组石榴石麻粒岩相岩石捕虏体, 它们的矿物组合和形成条件不同与以往的报道, 是一种特殊的深源捕虏体类型.

1 岩石学和矿物学特征

广东雷州英峰岭玄武质火山角砾岩中含有大量地幔橄榄岩捕虏体和辉石、石榴石、斜长石巨晶. 捕虏体的个体普遍较小, 大多在 10 cm 以下. 最近笔者在其中发现了少量的麻粒岩相岩石捕虏体, 其大小一般在 2.5 cm × 3.5 cm 左右, 岩性包括二辉斜长麻粒岩(LZ_m)、石榴石单辉麻粒岩(xw_2)、尖晶石榴辉石岩(xw_3) 和透辉斜长麻粒岩(xw_4). 石榴石单辉麻粒岩(xw_2) 的矿物组成是 Pl+ Cpx+ Gt+ Ru. 尖晶石榴辉石岩(xw_3) 主要由 Cpx+ Gt+ Sp 组成, Opx 含量低于 5%, 不透明矿物是钛铁矿. 透辉斜长麻粒岩(xw_4) 的矿物组成简单, 为 Pl+ Cpx+ Il, 其中钛铁矿(Il) 含量超过 5%, 而二辉麻粒岩具有典型的 Pl+ Opx+ Cpx+ Il 组合. 捕虏体都呈中粗粒状变晶结构, 块状构造. 矿物之间没有反应包含关系, 但 xw_2 和 xw_3 中的石榴石边缘往往存在由于减压退变形成的暗色次变边, 而 xw_4 中 Cpx 边缘则存在后期熔蚀

形成的“海绵边”, 反映它们来源较深.

矿物成分的探针分析结果列于表 1. 4 个样品的单斜辉石(Cpx) 成分不尽相同. xw_2 中 Cpx 以高 Al_2O_3, Na_2O 和低 CaO 为特征, 属于富铝普通辉石(图 1). xw_3 的 Cpx 富 SiO_2, MgO 和 CaO, 但贫 FeO, 是较典型的透辉石(图 1). xw_4 的 Cpx 为次透辉石(图 1), 其 Al_2O_3, Na_2O, FeO 和 TiO_2 含量最高, 但 SiO_2 含量偏低. 这 3 种捕虏体中 Cpx 较华北麻粒岩地体以及已报道的二辉麻粒岩捕虏体中的 Cpx 都富 Al_2O_3(7.09% ~ 10.37%) 和 Na_2O (1.44% ~ 2.35%)[1~5], 表明富含硬玉(Jd) 组分(10.5% ~ 17.5%), 暗示它们形成于较高的压力下. 二辉麻粒岩(LZ_m) 中 Cpx 也属次透辉石(图 1), 但 Al_2O_3 和 Na_2O 含量很低, 说明形成压力较低.

表 1 英峰岭麻粒岩相岩石捕虏体的矿物平均化学成分和温压计算结果

样号	xw_2			xw_3				xw_4		LZ_m		
矿物	Gt	Cpx	Pl	Gt	Cpx	Sp	Opx	Cpx	Pl	Cpx	Opx	Pl
样品数	9	10	6	5	7	5	3	5	7	3	5	1
SiO_2	40.12	49.48	60.96	41.55	51.34	0.04	53.54	46.69	59.06	51.39	51.13	57.27
TiO_2	0.24	1.14	0.03	0.05	0.26	0.04	0.08	1.71	0.04	0.27	0.08	0.02
Al_2O_3	22.73	7.69	24.73	24.37	7.09	67.20	5.30	10.41	25.66	1.76	0.942	25.85
Cr_2O_3	0.03	0.06	0	0.10	0.10	1.04	0.06	0.02	0.00			
FeO	18.51	8.80	0.13	8.55	2.80	10.11	6.94	10.59	0.20	10.87	27.66	0.06
MnO	0.42	0.13	0.01	0.39	0.11	0.09	0.20	0.11	0.01	0.36	0.70	0.04
MgO	12.70	12.30	0.02	19.80	15.17	21.72	32.40	9.37	0.02	12.87	18.65	0.02
CaO	5.61	17.51	5.84	5.09	21.06	0.00	0.65	18.19	6.68	21.6	90.73	9.45
Na_2O	0.06	2.24	7.37	0.03	1.44	0.02	0.11	2.35	7.37	0.42	0.02	6.64
K_2O	0	0	0.78	0	0	0.00	0	0	0.67	0.00	0.01	0.41
总计	100.43	99.35	99.87	99.92	99.37	100.26	99.28	99.43	99.70	99.63	99.92	99.76
$Mg^{\#}$	0.56	0.71		0.80	0.91	0.79	0.89	0.61		0.68	0.55	
A*	47.3	41.2	29.0	68.9	47.5		87.9	33.0	32.1	37.0	53.8	43.1
B*	36.8	16.7	66.3	17.6	5.1		10.9	21.1	64.1	18.1	44.7	54.8
C*	15.0	42.1	4.7	12.3	47.4		1.3	46.0	3.8	44.9	1.5	2.2
T/℃	1 135[a)]	1 150[b)]	1155 ~ 1165[c)]	915[d)]	935[e)]	910[f)]	945[g)]			783[h)]	821[i)]	平均 800 ℃
P/GPa	1.44	1.47	1.65 ~ 1.70	1.08	1.15	1.16	1.32			0.65~ 0.80		

* A, B, C 分别表示石榴石、辉石和长石的 Py, Alm, Gross; En, Fs, Wo 和 An, Ab, Or 的含量. 温度计+ 压力计: a) Krogh(1988) + Newton & Perkins(1982); b) Ellis & Green(1979) + Newton & Perkins(1982); c) Krogh and Ellis & Green (1979) + Jd17(Holland, 1980); d) Brey & Kohler_2Py+ Brey & Kohler(1990); e) Brey & Kohler(1990)_Opx+ Brey & Kohler (1990); f) Wells(1977) + Nickel & Green(1985); g) Brey & Kohler(1990)_Opx+ Nickel & Green(1985); h) Wood & Banno (1973); i) Wells(1977)

英峰岭捕虏体中的石榴石成分与金伯利岩中榴辉岩和大别山超高压带中超镁铁质岩石的石榴子石相似[6](图 1). 与华北出露的晚太古代高压麻粒岩中的石榴石相比, 明显的富 MgO 而贫 FeO(图 1). 与大别山榴辉岩中的石榴石相比, MgO 偏高, 而 CaO, FeO 较低. 斜方辉石(Opx) 见于尖晶石榴辉石岩(xw_3) 和二辉麻粒岩(LZ_m). 前者以富 Al_2O_3, 高 MgO 和低 FeO, 不同于 LZ_m 和其他地区麻粒岩中的 Opx[1~5]. 实验研究表明, 与石榴石共生的 Opx 的

Al_2O_3 含量随压力增高而降低, 随温度升高而增多. 英峰岭尖晶石榴辉石岩中 Opx 的富 Al_2O_3, 很可能反映了它较高的形成温度. LZ_m 的 Opx 富铁低铝, 属于富铁紫苏辉石, 是典型的变质成因 Opx.

斜长石存在于 3 个麻粒岩捕虏体中, 其中 2 个单辉麻粒岩的斜长石成分接近, 属于中更长石(表 1), An 值低于二辉麻粒岩(LZ_m) 以及麒麟[2]、女山[1] 和汉诺坝[3] 等地二辉麻粒岩捕虏体的斜长石 An 值, 这同样反映本区单辉麻粒岩形成于较高的压力下.

xw_3 中的尖晶石是一种典型的镁(铁) 尖晶石, 成分相似于麒麟尖晶石辉石岩中的尖晶石, 而不同于尖晶石二辉橄榄岩中的尖晶石[2]. 尖晶石与石榴石共生说明在捕获之前岩石处于尖晶石辉石岩与石榴石辉石岩的转换带中(图 2).

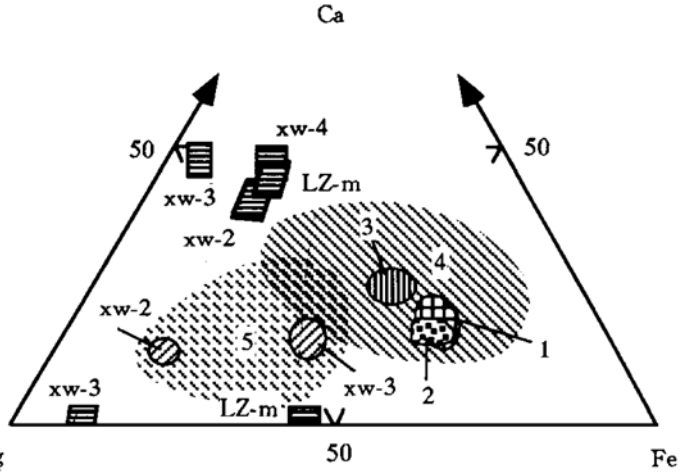


图 1 辉石和石榴石 Ca_Mg_Fe 图解

横线区为辉石, 斜线区为石榴石. 高压麻粒岩中 Gt: 1——威海, 2——蔓箐沟[4], 3——松树沟[5]. 4——大别山榴辉岩中 Gt, 5——大别山超镁铁岩和世界上金伯利岩中榴辉岩的 Gt[6]

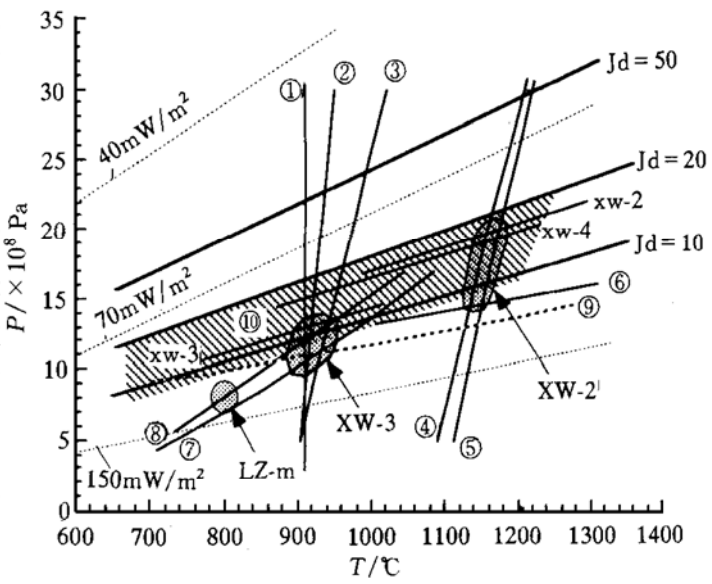


图 2 英峰岭捕虏体的 P_T 图解

温度计: Wells (1977); ④B 和 K two_pyroxene (1990); ㈣B 和 K 的 Opx(1990); Krogh Cpx_Gt(1988); Ellis 和 Green Cpx_Gt (1979); 压力计: N 和 P GCPS (1982); ⑧B 和 K Opx_Gt (1990); ㈦Nickel 和 Green Opx_Gt(1985); ㈦尖晶辉石岩与石榴辉石岩转换带[2]; ㈤石榴麻粒岩相(Ringwood, 1975)

2 形成温压条件

根据 O' Reilly 等人[7, 8] 的研究, 对于 $Mg^{\#} < 0.80$ 的富 Fe 石榴子石的辉石岩采用 Ellis 和 Green 的 Cpx_Gt 温度计较为适宜, 而对于石榴石 $Mg^{\#} > 0.80$ 和斜方辉石 $Mg^{\#} > 0.85$ 的辉石岩和橄榄岩, 利用 Brey 和 Kohler[9] 斜方辉石温度计或二辉石温度计与 Brey 和 Kohler[9] 或 Nickel 和 Green 的 Gt_Opx 压力计组合可以获得理想的温压值. 因为 xw_2 中石榴石的 $Mg^{\#} < 0.80$, 因此用 Ellis 和 Green 和 Krogh 的 2 个 Cpx_Gt 温度计与 Newton 和 Perkins 的 GCPS 压力计结合, 计算获得 xw_2 的形成温压分别是 1 135 ℃_1.44 GPa 和 1 150 ℃_1.47 GPa(表 1, 图 2). 由于 xw_2 中不含石英, 故获得的压力代表了其形成压力的下限. 如果将上述温度计与透辉石中硬玉组分(Jd= 17) 平衡反应曲线相交, 则得到的温压条件是1 155 ℃_1.65 GPa 或 1 165 ℃_1.70 GPa(图 2).

xw_3 中石榴子石 $Mg^{\#} \geqslant 0.80$, 斜方辉石 $Mg^{\#} > 0.85$. 因此, 本文采用 Brey 和 Kohler[9] 的斜方辉石温度计和二辉石温度计, 以及 Wells 二辉石温度计与 Brey 和 Kohler[9] 以及 Nickel

和 Green 的 Opx_Gt 压力计结合, 从而获得 xw_3 的形成温度是 910~ 945 ℃, 压力是 1.08~ 1.32 GPa(表 1, 图 2). 另外与其单斜辉石中硬玉组分(Jd= 11)相关的平衡曲线, 以及尖晶石辉石岩和石榴石辉石岩转换带也正好经过这一计算范围(图 2), 表明上述计算结果是合理的. 利用 Wood, Banno 和 Wells 的二辉温度计计算了 LZ_m 的形成温度是 850 ℃, 考虑到这 2 个温度计计算结果往往高于实际值50 ℃左右[3], 因此 LZ_m 实际结晶温度在 800 ℃左右. 根据与 Pl 平衡的 Cpx 的 Al_2O_3, Na_2O 含量和 Al^{IV} 指数可以大致估计[1, 3] LZ_m 的形成压力在 0.65~ 0.80 GPa. xw_4 中由于缺乏与 Cpx 相配的其它铁镁矿物, 因此无法精确估算它的形成温压. 但根据与 Pl 共生的 Cpx 中硬玉百分含量(Jd= 16), 推测它形成于与 xw_2 相似的压力条件下.

3 结论和地质意义

上述温压计算表明, xw_2, xw_3 和 xw_4 形成于很高的温压条件下, 落在 Ringwood (1975) 划定的石榴石麻粒岩相范围(图 2). 这是首次在我国新生代玄武岩中发现含石榴石的高压麻粒岩捕虏体. LZ_m 落在辉石麻粒岩相范畴, 与我国已报道的大多数辉石麻粒岩捕虏体的温压相似(图 2). 从英峰岭捕虏体在 *P_T* 图上的分布可见, 它们可以构成一条地温梯度很高的地温曲线, 其地温梯度高于大洋地温梯度, 与安徽女山[8]、广东麒麟[2]和澳大利亚东南等地的古地温梯度相似. 图 2 还显示当时的热流值可达到 90~ 110 $mW \cdot m^{-2}$. 如此高的地温梯度和热流值应与强烈的地幔上隆和地壳拉张减薄相关, 表明本区在新生代以来是一个裂谷活动区. 地球物理资料也显示, 研究区正处于雷南_琼北地幔隆起区, 其 Moho 面深度只有 25.5~ 26.5 km[10], 明显小于周边地区. 这与由深源捕虏体获得的信息相吻合.

压力计算指出英峰岭石榴石麻粒岩相岩石捕虏体在被带出地表前形成于 35 km 以下(xw_2 可达 50 km 以上), 但地球物理资料表明目前本区地壳厚度仅有 26 km 左右. 一种可能是新生代以来的裂谷拉张作用和风化剥蚀使地壳厚度减薄了近 25 km. 第二种解释是这些石榴麻粒岩相岩石捕虏体就是形成于 35~ 或> 50 km 的上地幔浅部, 而下地壳主要由二辉麻粒岩(LZ_m)组成. 高的地温梯度已明确指出岩石形成于裂谷环境. 因此, 第二种解释符合地质实际. 这就是说在 Moho 下存在一岩石学上的过渡层, 该过渡层虽主要由橄榄岩组成, 但仍含有相当比例的辉石岩和基性高压麻粒岩. 这些基性高压麻粒岩和二辉麻粒岩是来自于更深部的玄武质岩浆在上地幔和下地壳的环境中结晶_变质形成.

下地壳至上地幔(或过渡层)麻粒岩捕虏体已在华南的麒麟、道县和雷州等地区发现, 最近笔者又在浙江西垄的火山岩中发现了基性麻粒岩捕虏体(将另文详述). 说明在华南的下地壳普遍存在一个辉长质麻粒岩层. 但不同地点麻粒岩的特征有一定差异, 反映了构造背景的差异. 这一麻粒岩层是否都由底侵的玄武质岩浆结晶_变质形成, 还是属于古老的变质结晶基底还有待于进一步的地球化学和同位素年代学的研究.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49773191)资助项目.

参 考 文 献

1 周新民, 于津海, 徐夕生. 女山玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现与意义. 科学通报, 1992, 37(13): 1 198~ 1 201

2 Xu X, O' Reilly S Y, Zhou X, et al. A xenolith_derived geotherm and the crust_mantle boundary at Qilin, southeastern China. Lithos, 1996, 38(1~ 2): 41~ 62

3 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. 科学通报, 1996, 41(3): 235~ 238
4 翟明国, 郭敬辉, 阎月华, 等. 中国华北太古宙高压基性麻粒岩的发现及其初步研究. 中国科学, B 辑, 1992(12): 1325~ 1 330
5 刘 良, 周鼎武, 董云鹏, 等. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 PTt 演化轨迹. 岩石学报, 1995, 11(2): 127~ 136
6 Mottana A. Crystal_chemical evolution of garnet and omphacite microprobe analysis, its bearing on the the classification of eclogites. Lithos, 1986, 19: 171~ 186
7 O' Reilly S Y, Griffin W L. A xenolith_derived geotherm for southeastern Australia and its geological implications. Tectonophysics, 1985, 111: 41~ 63
8 Xu X, O' Reilly S Y, Griffin W L, et al, The nature the Cenozoic lithosphere at Nushan, eastern China. In: Martin F J F, Zhong S L, eds. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia, Am Geophy Union, 1998 (in press)
9 Brey G P, Kohler T. Geothermobarometry in four_phase lherzolites II. new thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. J Petrol, 1990, 31(6): 1 353~ 1 378
10 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1988. 788~ 794

(1997-07-21 收稿, 1998-01-04 收修改稿)

东乌珠穆沁中铁陨石金属相的场发射扫描电镜研究

毛艳华 王道德
(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要 应用高分辨率的场发射扫描电镜对东乌珠穆沁中铁陨石中 Fe-Ni 金属相的微结构进行了研究. 表明镍纹石条带具边缘亮边和内部云状花纹带的分带构造特征, 云状花纹带发育典型的"孤岛-蜂窝"微结构, 孤岛相的大小平均为 358nm, 由此估算出东乌珠穆沁中铁陨石在低温阶段(< 400 ℃)的冷却速率约为 0.5 ℃/Ma. 通过对金属相中铁纹石和镍纹石 Ni 浓度分布剖面的测定, 根据最新的低温 Fe-Ni 二元相图, 对东乌珠穆沁中铁陨石的金属相显微结构的成因进行了详细地探讨.

关键词 **场发射扫描电镜 Fe-Ni 金属相 微结构 中铁陨石 东乌珠穆沁**

自 70 年代末以来, 在铁陨石、中铁陨石和球粒陨石中发现了镍纹石的带状构造和其他复杂的精细结构, 并认为是陨石母体在低温条件下经历一系列相转变作用的产物[1]. 陨石金属相的主要组成为 Fe 和 Ni, 并含少量的 Co, P, S 和 C, 是研究 Fe-Ni 二元体系低温相转变的理想样品[2]. 近年来, 通过对陨石金属相微结构和微区分析研究, 获得了较完整的 Fe-Ni 二元体系低温阶段(< 400 ℃)的相图[3]. 陨石金属相的微结构研究对冶金学和太空材料科学具重大的理论价值和实验指导意义.

中铁陨石是一种稀少的陨石类型, 它经历了极为复杂的形成和演化历史[4]. 同其他类型陨石相比, 中铁陨石的金属相具有粗大的、发育完好的微结构, 因此更有利于对陨石母体低温热历史进行研究. 目前所获得的中铁陨石冷却速率小于 1 ℃/Ma, 冷却时间超过 500 Ma[5].