大别山超高压岩石形成深度局限于 100~ 150 km 吗?
——针状含钛铬磁铁矿的发现及动力学意义的思考

金振民　金淑燕　高 山　赵文霞④
(　中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; ④中国地质大学岩矿测试中心, 武汉 430074)

摘要　在大别山碧溪岭石榴石橄榄岩的早期世代粗粒橄榄石中发现针状(或杆状)出溶体, 长度为 5~ 30 μm, 宽度 2~ 6 μm, 沿橄榄石[010]方位定向排列. 经综合方法鉴定研究结果表明, 这种针状出溶体为含钛铬磁铁矿, 是β相橄榄石中出溶体, 它说明该超高压榴辉岩_超镁铁岩体形成的压力不只局限于柯石英_金刚石稳定场(3~ 4 GPa), 有可能在大于 10 GPa 以上(即 300 km 深度以下)形成.

关键词　超高压岩石　石榴石橄榄岩　含钛铬磁铁矿　地幔转化带　动力学

大别山超高压变质岩中柯石英和金刚石发现显示了这些矿物至少是在压力 3~ 4 GPa(即 100~ 150 km 深处)条件下形成[1~3]. 最近 Dobizhinetskaya 和 Green 在瑞士中阿尔卑斯 Alpe Arami 石榴石橄榄岩中发现了橄榄石 β 相(Wadsleyite)的钛铁矿出溶体, 并认为是在 10~ 15 GPa(即 300~ 450 km 的深度)地幔转化带(mantle transition zone)中形成的[4~6], 其主要根据有: (　)杆状 $FeTiO_3$ 呈超显微结构分布在早期世代橄榄石中; (　)TEM 证实杆状钛铁矿沿寄主矿物橄榄石的[010]方向构成拓扑结构; (　)寄主矿物橄榄石具有罕见的[010]优选方位, 是目前橄榄石高温高压流变学实验中从未有的方位[7]; (　)实验证实 Arami 橄榄石和 β- 相橄榄石中 TiO_2 的浓度是相近的, 这种 $FeTiO_3$ 出溶体是超高压相钙钛矿(Pervoskite)同质多形体[5]. 他们的研究成果表明 300 km 以下深度的地幔物质能够折返到地表, 这无疑对阿尔卑斯造山带动力学又是一个新挑战. 1995 年和 1996 年我们对碧溪岭石榴石橄榄岩体进行了野外考察和采样, 在研究橄榄石优选方位和流变学性质过程中发现了与 Arami 岩体中类似矿物, 唯成分不同, 即一种产于早期世代橄榄石中定向排列的针状含钛铬磁铁矿出溶体.

本文主要报道含钛铬磁铁矿产出特点、优选方位和成分特征研究的初步成果, 并对其超高压动力学意义进行了探讨.

1　样品的地质背景

安徽岳西县碧溪岭含柯石英榴辉岩_超镁铁岩体位于大别山, 岩体呈不规则椭圆状, 出露面积约为 1.5 km^2[8~10]. 榴辉岩体内产有数十条石榴石橄榄岩和石榴石异剥橄榄岩透镜体, 两者界线清晰. 岩体围岩为大别群斜长片麻岩. 该岩体分布地质简图详见文献[11]中图 D2_1. 本次采样地点位于图 D2_1 中第 5 观察点(Stop 5)南南东约 200 m 处. 似层状或透镜状超镁铁岩厚度为 5~ 8 m, 主要由石榴石二辉橄榄岩和异剥橄榄岩组成. 本次研究样品主要为石榴石异剥橄榄岩(样号 D95_27 和 D96_5). 岩石呈绿黑色, 中粗粒板状变晶结构, 具弱页理条带状构造. 岩石主要由橄榄石(50% ±)、石榴石(25%)、铬透辉石(20%)组成, 其次有少量金红石副矿物. 蛇纹石呈不规则细脉穿插矿物颗粒间. 橄榄石具有两个世代: 早期橄榄石呈残斑状粗粒板状变晶结构, 颗粒大小为 0.5~ 5 mm, 略有压扁拉长现象; 晚期世代橄榄石呈细粒

(0.1~ 0.3 mm) 重结晶结构分布于早期世代橄榄石周围或矿物粒间. D95_27 样品主要矿物的化学成分见表 1. 在这个样品中还见有相当数量的含钛斜硅镁石(titanoclinohumite), 部分钛斜硅镁石因减压分解而形成橄榄石_钛铁矿交生蠕虫状结构.

表 1 石榴石异剥橄榄岩矿物化学成分[a] (单位: 重量%)

D95_27	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na_2O	K_2O	V_2O_5	合计
橄榄石	40.77	0.02	–	0.12	12.97	0.22	46.13	0.02	0.12	0.58	0.03	0.01	100.98
铬透辉石	55.88	0.12	2.57	1.35	6.37	0.33	12.97	16.02	–	4.77	–	0.09	100.47
石榴石	40.41	0.03	21.15	1.87	16.24	0.60	14.68	3.67	0.23	0.35	–	–	99.23

a) 分析者: 中国地质大学(北京) 电子探针室李树岩教授

2 分析方法

用中高倍光学显微镜分别观察样品结构, 区分两个不同世代橄榄石特征和针状出溶体分布状况. 采用弗氏台测定定向排列杆状出溶体与橄榄石晶格优选方位的拓扑关系. 用能量损失谱仪(EDS) 半定量分析出溶物元素成分. 利用 CM12 型(菲利浦) 透射电子显微镜(TEM) 的选区电子衍射(SAED) 分析法, 确定橄榄石和针状出溶体的衍射图谱. 应用氧化缀饰法(Oxidation decoration) 对橄榄石位错构造进行流变学研究, 查明不同晶格方位的位错与针状出溶物的关系.

3 结果和讨论

在早期世代粗粒板状橄榄石晶体中见有大量定向排列杆状或针状出溶体, 单偏光下为灰黑色. 杆状出溶体的长度一般为 5~ 30 μm, 平均为 15 μm, 宽度 2~ 6 μm(图 1(a)、(b)). 对 10 个薄片 50 个橄榄石晶体中针状出溶体矿物含量进行统计, 约占总体积的 0.2%~ 1%. 此外还见有不规则粒状(直径 10~ 15 μm) 的铬铁矿、钛铁矿、含 Ni, Zn 矿物, 呈包裹体形式产于橄榄石之中. 用弗氏台对 5 个杆状(或针状) 出溶体产出方位测定结果表明, 这些出溶体都是沿着橄榄石[010] 方向展布. 在细粒重结晶橄榄石中没有见到这些针状出溶物. 半定量 EDS 分析表明, 寄主矿物具有橄榄石特征的 Si, Mg, Fe 峰值(图 1(c)、(d) 左端); 杆状矿物具有钛铬磁铁矿特征的 Fe, Ti, Cr 峰值(图 1(c)、(d) 右端). 由于杆状出溶体宽度很小, 电子探针无法测定精确成分. 通过挑选最大的杆状出溶体 6 个点进行分析, 平均成分含量总计仍为 92.74%(表 2), 分析结果总量偏低. 电子探针结果与能量损失谱仪分析的基本成分是相当的, 因此推断杆状出溶体成分应为含钛铬磁铁矿.

表 2 橄榄石中针状出溶体电子探针分析结果[a] (单位: 重量%)

D95_27	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	V_2O_5	NiO	合计
分析结果	0.01	1.18	1.79	13.75	72.71	0.00	1.57	0.00	0.64	0.13	0.54	0.42	92.74

a) 分析者: 中国地质大学(北京) 电子探针室李树岩教授

经透射电子显微镜电子选区衍射图谱分析, 证实粗粒晶体寄主矿物具有橄榄石晶体结构, 而针状出溶体具有磁铁矿晶体结构. 氧化法薄片观察结果显示, 橄榄石中仅见有被磁铁矿缀饰的[100] 和[001] 方向位错, 沿[010] 方向位错没有出现.

研究结果表明, 含钛铬磁铁矿石榴石橄榄岩空间上产出与含柯石英榴辉岩密切共生, 这种矿物以杆状、针状出溶体沿着橄榄石[010] 方向分布为特征, 此现象至少到目前为止还是很少

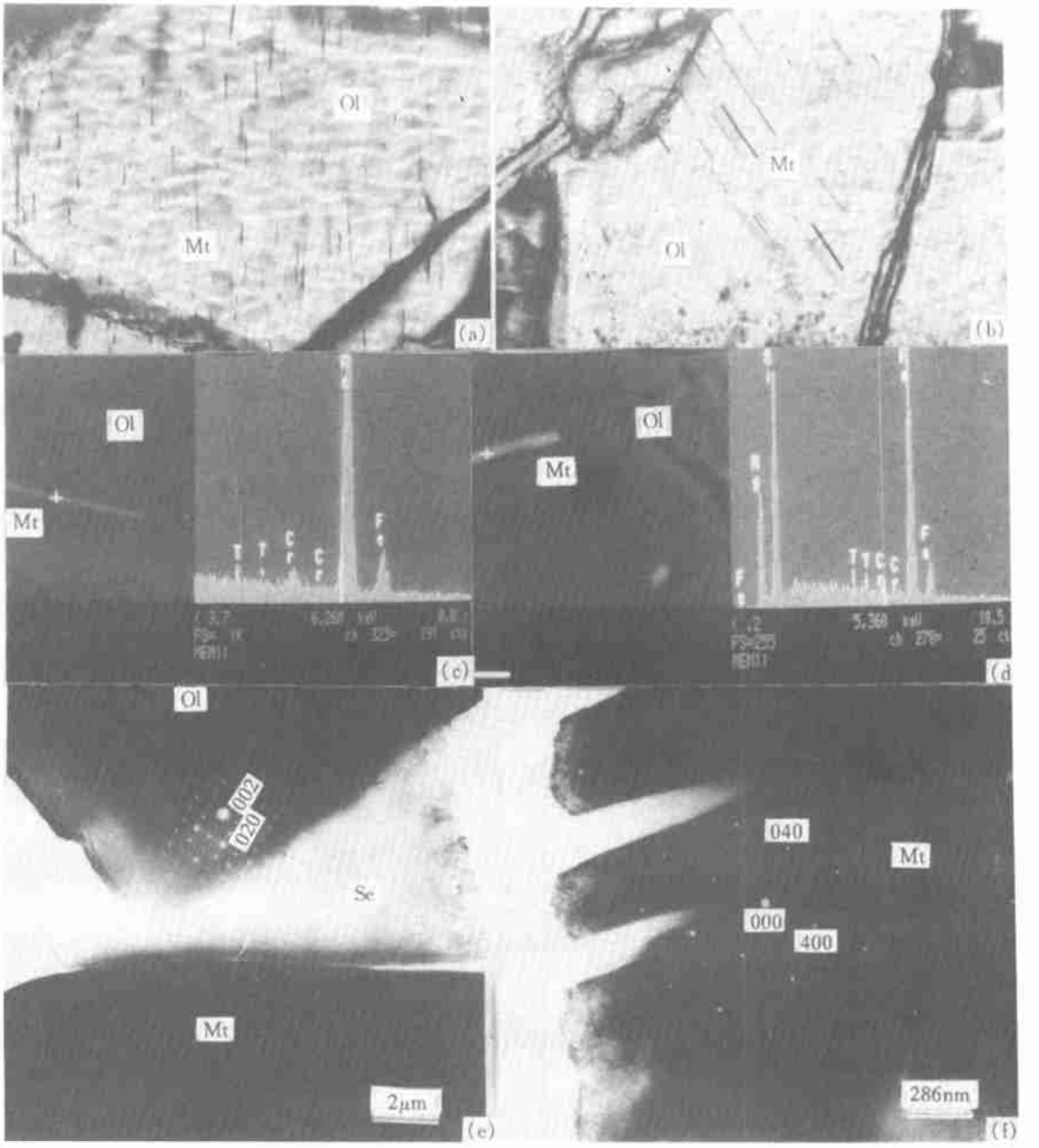


图 1　橄榄石中针状含钛铬磁铁矿出溶体的特征

(a)、(b) 为定向排列针状钛铬磁铁矿，磁铁矿出溶体(Mt)，橄榄石_ol，样号 D95_27 和 K96_5；(c)、(d) 为(a)、(b) 照片中针状钛铬磁铁矿的能量损失谱分析(EDS)；(e)、(f) 为(a) 照片(D95_27) 中寄主矿物橄榄石(Ol) 和磁铁矿出溶体(Mt) 的 TEM 选区衍射图谱(像机长度分别为 370 mm 和 770 mm)，Se 为蛇纹石

见的. 与 Arami 结果类比, 初步认为这种特殊方向和特有形态产生的钛铬磁铁矿出溶体可能是 β 相橄榄石稳定场中 Fe_2SiO_4-磁铁矿的固溶体, 也是一种超高压相矿物的代表, 这说明了碧溪岭超高压榴辉岩_超镁铁岩体形成压力不仅局限于柯石英_金刚石的稳定场(3~ 4 GPa), 有可能大于 10 GPa 以上(即 300 km 深度以下). 本文认为: (　) 橄榄石(斜方晶系) 和磁铁矿

(等轴晶系)两者具有不同的晶体结构,不会形成固溶体出溶结构;( )含钛铬磁铁矿仅沿着橄榄石[010]方位定向分布;( )等轴晶系磁铁矿是反尖晶石型结构,它与假等轴晶系 β- 橄榄石有可能形成固溶体出溶结构;( )国外有关 Fe_2SiO_4_磁铁矿固溶体的实验正在研究之中,最近 Liu Jingbo 等人[1)]的初步实验表明 Fe_2SiO_4-磁铁矿可以在超高压下形成固溶体. 值得强调指出的是,在大别山超高压岩石中出现这种矿物不是孤立现象. 最近 Zhang Ruyuan[1)]也在苏鲁石榴石橄榄岩中发现磁铁矿出溶片[2)];叶凯等人[3)]在青岛仰口橄榄岩的石榴石中发现大量单斜辉石、金红石和磷灰石出溶体以及橄榄石中针状富含 Cr 钛铁矿和含 Cr 较高的铁矿物,这与 Haggerty 等人[12]在南非发现大于 300 km 深度幔源包体结构是完全类似的. Yang 等人[13]在江苏发现压力大于 6 GPa 含菱镁矿石榴石橄榄岩. 碧溪岭岩体的针状矿物与 Arami 岩体的针状矿物主要不同之点在于橄榄岩中 TiO_2 和 FeO 浓度不同,故前者为含钛铬磁铁矿,后者为含 Cr 钛铁矿. 有 3 种其他成因解释可以排除:( )前人已发现橄榄石中比较常见的网格状磁铁矿针状体[14],然而这种针状体是由磁铁矿_普通辉石组成的 A 型交生结构(A_Symplectite),这种磁铁矿并非仅沿[010]固定方向展布;( )[010]方位的针状磁铁矿是橄榄石天然氧化位错产物吗? 大量橄榄石流变学实验和天然橄榄石位错研究业已证实[15, 16],[100]是橄榄石最易滑移方向,[010]滑移方向是极为罕见的. 碧溪岭橄榄石的位错研究表明,经氧化之后磁铁矿是沿着[100]和[001]方向大量分布,并没有任何磁铁矿沿[010]方向分布;( )橄榄石在蛇纹石化蚀变过程中可能产生磁铁矿,但是这种磁铁矿优先选择[010]方向氧化是不可能的. 因此,碧溪岭含钛铬磁铁矿针状出溶体发现,促使我们进一步思考,大别山超高压岩石形成深度仅局限于 100~ 150 km 深度吗? 这种针状磁铁矿出溶体为什么沿着橄榄石[010]方向分布? 它具有什么样特殊结构和确切压力? 它的动力学真实函义是什么等问题,将有待进一步研究.

致谢 在 2 年多研究过程中,与加利福尼亚大学(Riverside) H. W. Green 和 L. Dobrzhinetskaya 教授进行了多次讨论;1997 年 10 月份与从柏林教授、叶凯和刘景波博士也进行了有益讨论;杨勇和刘祥文在测试工作方面给予帮助;参加 1995 年野外考察的还有许志琴、李锦铁、董树文、杨天楠. 本工作为国家自然科学基金(批准号:49672144)、国家教委基础研究基金、中国大陆科学钻探计划项目和地矿部壳_幔交换动力学开放实验室联合资助项目.

参 考 文 献

1 Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite_bearing eclogite from the Dabie Mountains in Central China. Geology, 1989, 17: 1085~ 1088

2 Okay A L, Xu S, Sengor A M C. Coesite from the Dabie Shan eclogite, Central China. European J Mineral, 1989, 1: 595 ~ 598

1) Liu Jingbo, et al, Preliminary experimental study on Fe_2SiO_4_magnetite solid solution. 中国中央造山带学术研究会论文摘要汇编(武汉), 1997.

2) International workshop on Chinese Continental Scientific Drilling, Qingdao. August, 1997

3) Significance of clinopyroxene, rutile and apatite exsolutions in garnet of eclogite at Yangkou, Shangdong Peninsua, Eastern China. 中国中央造山带学术研讨会论文摘要汇编(武汉), 1997

3 Xu S, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. Science, 1994, 256: 80~ 82
4 Green H W, Dabrzhinetskaya L. Alpe Arami: a peridotite massif from the transition zone. AGU, EOS, 1994, 77: 761
5 Dobrzhinetskaya L, Green H W. Alpe arami: a peridotite massif from depths of more than 300 kilmetors. Science, 1996, 271: 1 841~ 1 845
6 Green H W, Dobrzhinetskaya L, Rggs E M, et al. Alpe Arami: a peridotite massif from the mantle transition zone? Tectonophysics, 1997, 279: 1~ 21
7 Buiskool Toxopeus T M A. Petrofabrics, microstructures and dislocation substructures of olivine in peridotite mylonite (Alpe Arami, Switzerland). Leidse Geol Mededolingen, 1976, 51: 1~ 36
8 樊祺诚, 刘若新, 张 旗, 等. 大别山超高压镁铁_超镁铁岩的岩石学与高压岩石矿物组合. 中国科学, B 辑, 1996, 26(3): 265~ 70
9 翟明国, 从柏林. 苏鲁_大别山变质岩石大地构造学. 中国科学, B 辑, 1996, 26(3): 258~ 264
10 曹荣龙, 朱寿华. 安徽碧溪岭含柯石英榴辉岩的 U_Pb 与 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究. 地球化学, 1995, 24(2): 152~ 161
11 Third International Eclogite Field Symposium Second Workshop of Task Group ㉔6 for ILP. Chinese Science Bulletin, 1995, 40 (Supplement): 44~ 45
12 Haggerty S E, Sautter V. Ultra_deep (> 300 km) ultramafic, uppermantle xenoliths. Science, 1990, 246: 993~ 996
13 Yang J, Godard G, Kienast J R, et al. Ultrahigh_pressure (60 kbar) magnesite_bearing garnet peridotites from northeastern Jiangsu, China. J Geol, 1993, 101: 541~ 554
14 Moseley D. Symplectite exsolution in olivine. Aremican Mineralogist, 1984, 69: 139~ 153
15 Niccolas A, Poirier J P. Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. New York: John Wiley & Sons, 1976, 187~ 199
16 Jin Zhenming, Green H W, Borch R S. Microstructures of olivine and stresses in the upper mantle beneath eastern China. Tectonophysics, 1989, 169: 23~ 50

(1998-02-23 收稿, 1998-03-04 收修改稿)

二层 Phillips 模型的非线性稳定性判据的最优性之讨论

穆 穆
(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 对于建立的二层 Phillips 模型的非线性稳定性判据, 考察其最优性. 结果表明, 对于给定的有限纬向周期通道, 当该判据的条件被破坏时, 可以不存在指数增长型的正规模. 但此非线性稳定性判据在下述意义下是最优的: 若其被破坏, 除去若干临界情形之外, 至少存在某一有限纬向周期通道, 在其中存在随时间指数增长的纬向正规模.

关键词 **Phillips 模型** **非性线** **稳定性**

二层 Phillips 模型是地球流体力学中的重要模型, 不少作者研究了其线性与非线性斜压不稳定性. 作者等[1] 曾建立了该模型的非线性稳定性判据. Vanneste[2] 指出, 文献[1] 中的这一充分条件亦是必要的, 即: 若它被破坏, 则一定存在随时间指数增长型的(纬向) 正规模, 因而是线性不稳定的. 本文的目的在于澄清这一结论是不确切的, 并证明了对于给定的有限纬向周