

新太古代大洋岩石圈地幔的显微变形探讨* ——以遵化蛇绿混杂岩带为例

黄雄南 李江海 牛向龙 冯 军

北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

摘要 遵化新太古代蛇绿混杂岩中的地幔岩显微构造以粗粒镶嵌构造为主, 矿物颗粒多以弧形边界紧密镶嵌, 部分岩石出现粒间熔体. 橄榄石出现残斑构造、动态重结晶和拉长变形, 铬铁矿出现典型的高温拉分构造, 表现出活跃的动态恢复、粒间滑移和扩散蠕变, 显示出大洋上地幔高温条件下塑性流变的特征, 是大洋板块侧向扩张的深部表现. 遵化蛇绿岩的地幔岩除了具有强烈的构造变形之外, 部分豆荚状铬铁矿保留有豆状、豆壳状等岩浆结构和构造, 并且有未变形的纯橄岩和辉石岩侵入, 说明位于一个岩浆较强烈活动的位置. 高温塑性侧向剪切变形和强烈的岩浆活动表明遵化蛇绿岩形成于快速扩张的洋脊, 类似阿曼蛇绿岩. 遵化蛇绿岩的围岩出现石英条带、核幔构造、动态重结晶和云母鱼等显微构造变形, 对应着蛇绿岩侵位到陆壳之后, 从中部地壳向上地壳抬升的构造运动过程.

关键词 新太古代 蛇绿混杂岩 显微构造 大洋上地幔 构造变形

蛇绿混杂岩是指组成蛇绿岩的不同岩石单元及其相关的沉积岩类以各种尺度的构造透镜体的形式出现在强烈韧性剪切变形的沉积岩或者蛇纹岩基质中, 一般被解释为洋壳俯冲或者仰冲的过程中, 洋壳残片发生刚性剪切破裂, 构造混入与之接触的强烈剪切变形的陆壳物质中, 形成的带状分布的非正常沉积岩石组合, 被普遍认为是板块会聚碰撞的证据^[1~4].

阿曼、塞浦路斯等典型蛇绿岩的地幔岩组分发育有高温塑性变形显微构造, 如构造橄榄岩发育粗粒碎斑构造、粗粒镶嵌构造, 豆荚状铬铁矿发育拉分构造, 被解释为早期大洋地幔岩石圈侧向增生和扩张的证据^[5,6]. 而在蛇绿混杂岩中, 构成蛇绿岩套的岩石以刚性构造块体的形式出现在剪切基质中, 内部往往保留着早期的变形构造^[4]. 因此对蛇绿混杂岩的显微构造的研究可以揭示古大洋岩石圈早期的构造特征和变形机制, 有助于解释古板块扩张-汇聚的运动学过程.

最近发现的遵化新太古代蛇绿混杂岩位于冀东遵化构造带西端^[7], 在蛇绿岩保存有大量的地幔橄榄岩和豆荚状铬铁矿, 在对遵化蛇绿混杂岩已进行

的岩石学和构造地质学研究的基础上^[7,8], 本文重点分析遵化蛇绿岩的地幔橄榄岩和豆荚状铬铁矿显微构造特征, 探讨新太古代大洋地幔的构造变形及早期板块构造运动机制.

1 地质概况

在冀东遵化构造带中, TTG 片麻岩、镁铁质岩浆岩、表壳岩和花岗岩以逆冲岩片形式相互构造叠置, 有超过 1000 个大小从数米至数公里的超镁铁质构造透镜体已经被辨认出来, 以上岩石被 2.50 Ga 的英云闪长岩和 2.5~2.4 Ga 的花岗岩先后侵入^[9,10](图 1). 遵化北部即本文研究区, 位于构造带的西端, 在强烈剪切变形的片麻岩中出露有大量的镁铁质、超镁铁质透镜体. 前人的研究表明这些超镁铁质岩块主要岩石类型为纯橄岩、斜辉辉橄岩、二辉橄榄岩、斜方辉石岩和铬铁矿, 其中铬铁矿具有特征的豆状和空心豆状结构^[11,12]. 详细的野外填图和岩石学研究表明, 本地区普遍出现的超镁铁质、镁铁质岩块以不同尺度(0.1~300 m)的构造透镜体的形式出现在强烈韧性剪切变形的片麻岩

2002-09-20 收稿, 2003-01-08 收修改稿

*国家自然科学基金重点项目(批准号: 40242014; 49832030)和北京大学 985 项目资助

E-mail: xiongnan.h@163.com

中, 构成一套新太古代的蛇绿混杂岩, 蛇绿岩的铬铁矿具有豆荚状铬铁矿的特征, 可以与阿曼和塞浦路斯的蛇绿岩对比^[7,8,13].

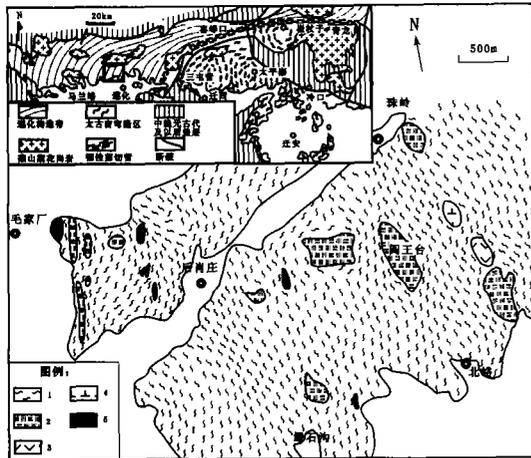


图1 遵化新太古代蛇绿混杂岩带地质图

1. 片麻岩; 2. 蛇纹石化橄榄岩; 3. 变质辉长岩;
4. 闪长岩; 5. 斜长角闪岩

遵化蛇绿岩主要由超镁铁岩(地幔岩, 包括方辉橄榄岩、纯橄岩以及侵入其中的辉石岩脉)、豆荚状铬铁矿、基性侵入岩(辉长岩)组成, 局部出现层状堆积岩、枕状熔岩、席状岩墙(斜长角闪岩化)和火山沉积岩(绿片岩), 规模很小, 分布有限^[7,8]. 蛇绿岩的围岩是一套被花岗闪长岩-闪长岩侵入的火山-沉积岩系(剪切基质), 岩石强烈剪切变形, 普遍发育重熔. 在本地区, 蛇绿岩的辉长-辉石质的堆积组分的层状结构保留有限, 枕状熔岩、变质火山岩(绿片岩化)的岩石强烈蚀变, 这些岩石的显微构造往往只反映后期变质、蚀变的特征, 本文不作讨论. 而蛇绿岩的地幔组分尽管也发生了强烈的蛇纹岩化, 但是通过大量的采样和详细的野外和室内观察, 在地幔岩的内部已经辨认出早期的构造变形, 包括宏观尺度的面理和线理构造、无根褶皱和布丁构造等^[8], 显微尺度的橄榄石扭折带(肯克带), 橄

榄石、辉石拉长构造和铬铁矿拉分构造等.

2 蛇绿岩构造变形特征

2.1 地幔橄榄岩显微构造

遵化蛇绿混杂岩带内的地幔橄榄岩由强烈构造变形的方辉橄榄岩和纯橄岩构成, 纯橄岩中的铬铁矿具有豆荚状铬铁矿的典型特征, 具有豆状(nodular)、豆壳状(orbicular)结构. 有辉石脉侵入地幔橄榄岩中, 宽度在1~10 cm^[8].

由于后期蚀变, 沿解理、裂理发生蛇纹石化, 矿物体积显著增加, 地幔橄榄岩的辉石、橄榄石显示出脆性破裂特征. 对于蛇纹石化相对较弱的矿物, 通过对破碎残斑的仔细观察, 包括根据同一矿物破碎形成的残斑具有相同的光学特性, 蛇纹石化矿物具有辉石、橄榄石假象, 沿先存的颗粒边界析出的铁氧化物显示原矿物结构等显微证据, 发现遵化蛇绿岩的地幔岩主要具有以下主要显微构造类型:

(1) 原生粒状构造, 主要保留在部分纯橄岩、豆荚状铬铁矿和少量辉石岩脉中, 表现为大小相近的矿物颗粒之间呈直线接触, 橄榄石出现扭折带(肯克带)(图版 I(a));

(2) 粗粒残斑构造, 保留在部分方辉橄榄岩和纯橄岩以及剪切变形的辉石岩脉中, 表现为大颗粒的橄榄石或者辉石周围分布着许多动态重结晶细碎矿物颗粒, 形成眼球构造, 粒间分布的铬铁矿构成平行的线理构造(如图 2(a)、图版 I(b));

(3) 粗粒镶嵌构造, 保留在大部分方辉橄榄岩和纯橄岩中, 分为两种类型: a 等粒镶嵌构造, 橄榄石近等粒紧密镶嵌, 颗粒边界呈弧形, 呈现扩散蠕变特征, 粒间的铬铁矿平行分布(如图 2(b)、图版 I(c)); b 板状镶嵌构造, 具有类似等粒镶嵌构造的特征, 但橄榄石往往被拉长或呈菱形, 长轴方向平行面理(如图 2(c)、图版 I(d)).

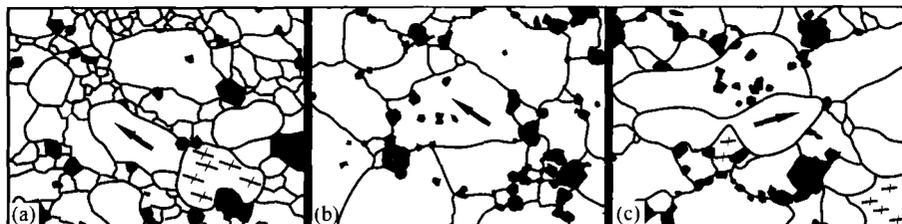


图2 遵化新太古代蛇绿混杂岩的地幔橄榄岩的显微构造

- (a) 粗粒残斑构造; (b) 等粒镶嵌构造; (c) 板状镶嵌构造. 无填充矿物为橄榄石, 黑色为铬铁矿, 填充十字为斜方辉石, 箭头平行面理方向. 视域 18 mm

根据橄榄石的变形机制^[14~16]可以知道, 在1000~1050℃时, 橄榄石的变形以位错蠕变为主, 出现扭折带和亚晶构造, 温度大于1050℃时, 出现动态重结晶作用和眼球构造, 而地幔橄榄岩(1300℃左右)的主要变形机制是动态重结晶作用, 当温度继续升高, 扩散蠕变在橄榄石的变形中起重要作用, 出现明显部分熔融. 遵化蛇绿岩的部分方辉橄榄岩的样品, 在板状变晶镶嵌的橄榄石和辉石粒间出现熔流体(保留有透辉石假象), 熔体先在颗粒的顶角出现, 最后汇聚成枝杈状, 是典型的地幔岩熔体浸染构造^[5](图版 I(e)).

遵化蛇绿岩的地幔岩显微构造以粗粒镶嵌构造为主, 橄榄石出现残斑构造、拉长变形, 矿物颗粒以弧形边界为特征紧密镶嵌, 表现出活跃的动态恢复、粒间滑移和扩散蠕变, 并且出现粒间熔体, 显示出上地幔高温条件下塑性流变的特征. 类似的显微构造在阿曼蛇绿岩中出现, 被解释为是古大洋扩张中脊之下上地幔层次的高温剪切运动造成的以塑性蠕变为主要变形机制的构造变形^[5].

2.2 豆荚状铬铁矿的显微构造

遵化蛇绿混杂带的铬铁矿具有典型豆荚状铬铁矿的结构和构造特征, 通常具有纯橄岩包壳, 矿体多为透镜状、扁豆状, 部分为不规则状^[12]. 部分矿石具有豆状结构、豆壳状结构、浸染状结构、块状结构和滞留硅酸盐矿物结构等未变形岩浆结构, 其中豆状和豆壳状构造是豆荚状铬铁矿(蛇绿岩型铬铁矿)的独有的构造^[17,18], 与阿曼、塞浦路斯等典型蛇绿岩非常相似^[5,19](图3). 相当部分铬铁矿显示出强烈的剪切变形, 出现条带状构造、褶皱或者片麻理构造甚至糜棱构造. 矿物成分分析表明遵化铬铁矿是高铬型的豆荚状铬铁矿, 变形和未变形矿石中铬铁矿成分差别不大, Cr/(Cr + Al)范围在0.77~0.83之间, TiO₂含量小于0.22%; 基质矿物主要为高镁橄榄石, 含94%~97%镁橄榄石分子(表1).

铬铁矿在豆状结构和豆壳状结构的外侧边缘呈它形晶, 内侧为自形晶, 而在浸染状结构和滞留结构中以自形晶为主, 通常具有大量包体矿物(以角闪

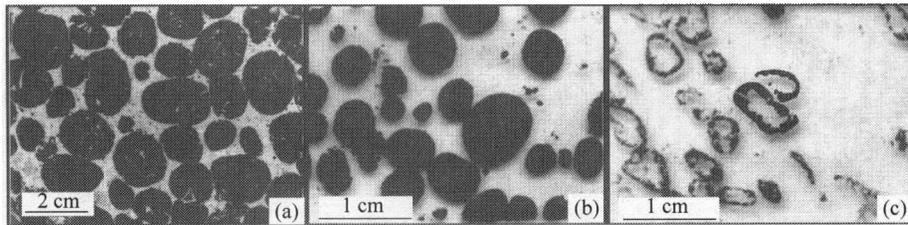


图3 豆荚状铬铁矿的特征构造

(a) 为塞浦路斯蛇绿岩豆荚状铬铁矿的豆状构造^[19]; (b), (c) 遵化蛇绿岩豆荚状铬铁矿的豆状和豆壳状构造

表1 遵化豆荚状铬铁矿主要矿物化学成分

成分(w/%)	铬铁矿							橄榄石		
	ZH-42-Cr1	02599-Cr	201Z14-Cr1	02506-2-2Cr	201Z12-Cr1	201Z12-Cr2	ZZ-03-Cr1	ZZ-03-Cr2	ZZ-03-O1A	ZZ-03-O1B
SiO ₂	0.061	0.020	0.000	0.090	0.034	0.037	0.024	0.021	41.890	41.400
MgO	3.980	13.670	8.510	12.640	13.560	13.820	12.540	12.590	54.530	55.000
FeO*	30.550	18.230	29.730	20.130	18.770	18.550	20.830	20.720	3.400	3.650
Al ₂ O ₃	10.730	6.040	8.380	8.400	9.840	9.780	7.880	8.060	0.026	0.000
CaO	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr ₂ O ₃	53.180	60.710	51.710	58.120	56.500	56.210	56.920	57.010	0.000	0.000
TiO ₂	0.000	0.160	0.144	0.150	0.210	0.175	0.124	0.160	0.000	0.000
MnO	2.220	0.630	1.229	0.670	1.226	1.370	0.554	0.563	0.045	0.058
NiO	0.032	0.070	0.221	0.190	0.137	0.070	0.118	0.018	0.579	0.472
K ₂ O	0.000	0.040	0.019	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.047	0.021
Na ₂ O	0.000	0.000	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
总和	100.752	99.570	100.001	100.390	100.276	100.012	98.998	99.145	100.517	100.600

样品在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院地质学系电子探针实验室测试, 探针系 JEOL 出产的 JXA-8100, 分析电压 15 kV. FeO* 为全铁.

石、金云母为主)(图版 I(f)). 在显微镜下观察, 豆状和豆壳状的铬铁矿有定向、分选, 有相互挤入, 显示出典型的岩浆堆积特征^[13]. 条带状或片麻状的豆荚状铬铁矿发育典型拉分构造, 即垂直最大拉张方向(近似面理方向)铬铁矿发育张裂隙, 被橄榄石(蛇纹石化)充填, 原生橄榄石被剪切拉长. 拉分构造中的张裂隙是高温条件下的变形, 是沿尖晶石颗粒边界发生拉张破碎, 属粒间迁移变形, 裂隙表现为锯齿形(图 4(a)), 与蛇纹岩化过程中的低温

破裂有明显差别, 后者为晶内变形, 裂隙是平直的, 通常贯穿整个晶体^[20]. 强烈的剪切变形(拉分构造)致使豆状、豆壳状和致密块状的铬铁矿破碎细粒化, 并且最终散布在橄榄石基质中, 沿平行线、面理方向分布(图 4(b), (c), (d)). 橄榄石发生塑性变形, 形成矿物拉伸线理, 和破碎的铬铁矿构成压扁拉长的网孔构造(图 4(c)). 这种铬铁矿发育拉分构造、橄榄石压扁拉长是蛇绿岩上地幔的高温(1250~1300℃)塑性变形特点^[5,20].

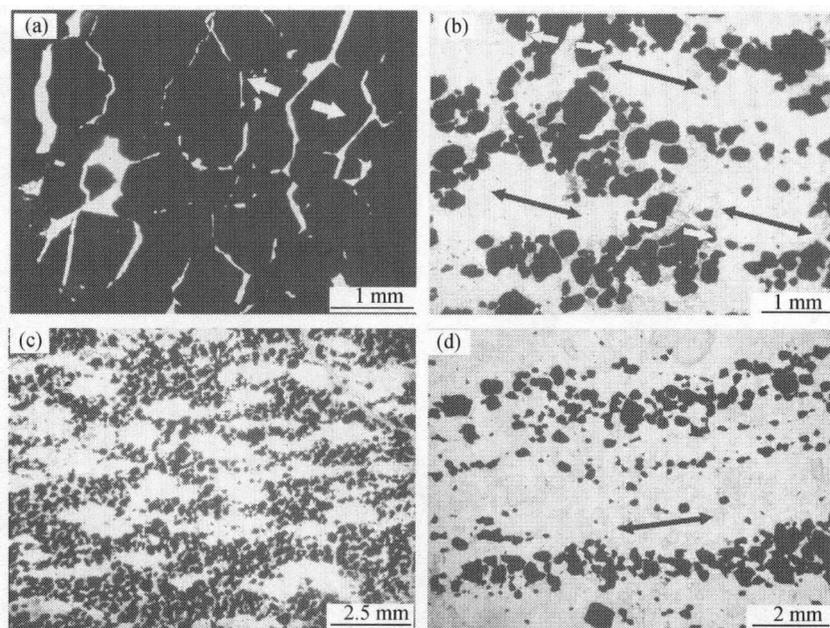


图 4 遵化蛇绿岩豆荚状铬铁矿的变形显微构造

(a) 紧密堆积豆状铬铁矿发育拉分构造, 沿尖晶石颗粒边界发生拉张破碎, 裂隙表现为锯齿形; (b) 原豆状结构的铬铁矿破碎细粒化, 并且最终散布在橄榄石基质中, 沿平行线、面理方向分布; (c) 具有拉分网孔构造的铬铁矿, 橄榄石集合体发生塑性变形, 被压扁拉长; (d) 为发生糜棱岩化的铬铁矿

对不同地区的蛇绿岩豆荚状铬铁矿的研究表明, 从上地幔扩张中心向两侧方向, 随着大洋板块的扩张运移, 豆荚状铬铁矿矿体形态从与围岩不整合的不规则形状变成整合的透镜状、板状, 而显微构造也由豆状、豆壳状变成发育拉分构造、褶皱、面理化和糜棱岩化构造, 反映高温条件下的强塑性变形^[5,20](如图 5). 遵化蛇绿岩的豆荚状铬铁矿属典型的高铬类型的豆荚状铬铁矿, 而且具有较多的角闪石、金云母等含水矿物, 说明遵化蛇绿岩可能形成于上俯冲带环境(岛弧或者弧后)^[19,21,22]; 而强烈的高温韧性变形的证据则表明其形成于快速扩张洋脊之下^[5,20,23].

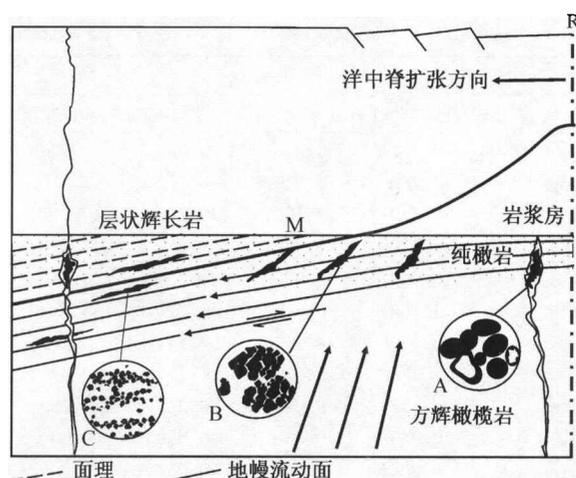


图 5 豆荚状铬铁矿变形构造演化模式(根据文献[5]改绘)

M 为岩石学莫霍面; R 为洋中脊. A 为豆状豆壳状显微构造; B 为铬铁矿拉分显微构造; C 为铬铁矿面理显微构造. 由 A~C 变形增强

3 围岩的构造变形

构成蛇绿混杂岩剪切基质的是一套强烈韧性剪切变形的变质陆缘沉积岩系, 包括 BIF(条带状铁建造)、变质杂砂岩、变泥质岩和变质火山沉积岩, 被碰撞型的岩浆系列侵入(以闪长岩-花岗岩为主, 包括部分辉长岩-辉绿岩)。由于变质作用, 前者主要以磁铁石英岩、黑云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩夹斜长角闪岩-角闪岩的形式出现, 后者变质成为角闪二云二长片麻岩夹面理化的斜长角闪岩, 黑云二长片麻岩、角闪斜长片麻岩夹斜长角闪岩条带^[8]。

由于区域变质作用, 本区的片麻岩形成均一的片麻理构造, 但是变质陆缘沉积岩系(副片麻岩)以细粒、富含云母或石榴石与正片麻岩能够区分。在显微镜下, 副片麻岩具有以下变形构造特征:

(1) 角闪岩相(局部麻粒岩相)的变形(片麻理)叠加了绿片岩相条件下的韧性变形, 后者表现为糜棱岩化作用, 形成石英和长石的波状消光、变形纹、机械双晶、亚颗粒化等构造, 使得原来的层理遭受破坏, 形成 S-C 组构, 而角闪石、云母、辉石、石榴石和斜长石等矿物发生退变质形成绿泥

石、绿帘石、黝帘石和绢云母等绿片岩相的矿物组合。在一些标本中甚至可以观察到 3 期面理, 表明剪切基质遭受了两期以上的构造变形, 使得其原生面理被改造, 最终与区域面理一致。

(2) 矿物组成不同, 主要变形构造不尽相同。在富长英质的磁铁石英岩、黑云母斜长石片麻岩中出现石英条带或者石英拔丝构造, 石英和长石发育波状消光、变形纹、亚颗粒化构造、核幔构造和动态重结晶, 局部出现云母鱼构造(图版 I(g))。而在基性成分相对多的岩石如角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩和角闪岩中, 显微构造以粒状变晶构造为主, 斜长石拉长变形, 普遍发育机械双晶、扭折带(图版 I(h))。

(3) 变形变质与重熔相伴随: 在长英质片麻岩里, 熔体矿物组成为斜长石 + 石英和钾长石 + 斜长石 + 石英两种, 在基性片麻岩、斜长角闪岩和角闪岩中, 斜长石 + 石英的熔体通常与石榴石、透辉石等变斑晶共生。前一种脉体比后一种脉体(含钾长石)的变形要强, 通常发生糜棱岩化, 表现为石英条带等显微构造(图 6(a))。

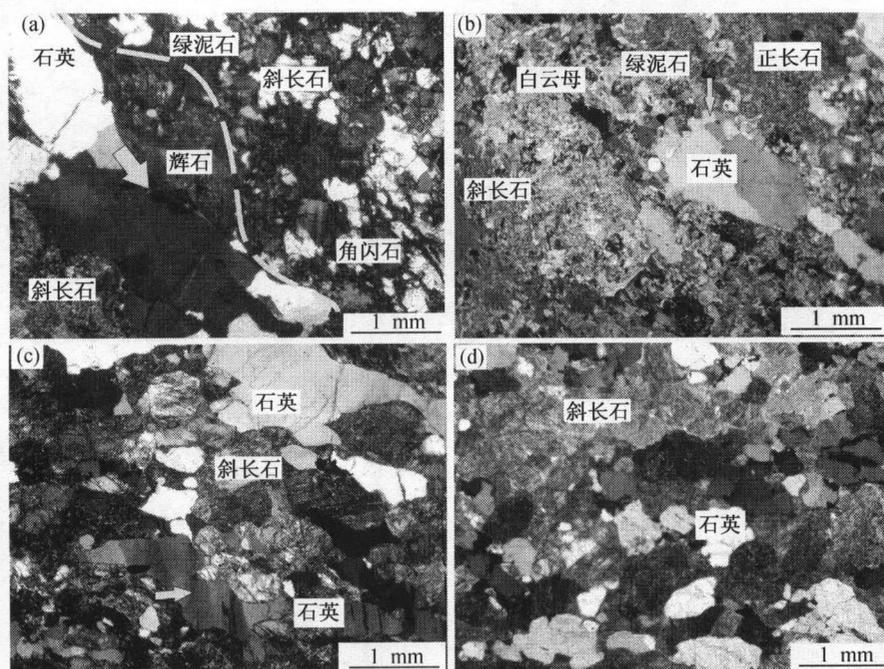


图 6 遵化新太古代蛇绿混杂岩部分围岩的显微构造变形

(a) 在斜长角闪岩中, 出现重熔脉体(斜长石 + 石英), 发生糜棱岩化, 石英呈条带状构造(如箭头所指); (b) 为绿泥石化的片麻岩, 出现石英核幔构造(如箭头所指); (c) 为强烈剪切变形的层状片麻岩, 石英出现扭折带(如箭头所指)、条带状构造; (d) 为弱变形的片麻岩, 为花岗岩变晶结构

正片麻岩的在显微镜下具有类似的变形构造特征,但部分岩石的变形相对较弱,只表现为石英的波状消光、变形纹、亚颗粒化和核幔构造(图6(b)),没有经历角闪岩相变质,是相对较浅层次的变形.对于发育明显的层状构造的地段,相邻的层状花岗岩具有不同的变形特征,有的强烈剪切变形,石英出现扭折带、条带状构造,有的仍保留原生花岗变晶结构,反映较浅层次变形的不连续性(图6(c)、(d)).而不同岩石重熔特征不一致:有的具有两期熔体,有的只有一期熔体或者不发育重熔.这些现象说明侵入副片麻岩的岩浆岩是多期的.

围岩的显微变形特征说明蛇绿岩的围岩至少经历了2个阶段的构造运动:(1)角闪岩相-麻粒岩相变形改造;(2)绿片岩相的构造变形,反映了蛇绿混杂岩的围岩从中部地壳到上部地壳抬升过程中的不同变形行为.

4 讨论

遵化蛇绿岩以构造透镜体的形式出现在强烈剪切变形的围岩片麻岩中,尽管经历后期的变形变质改造,但经过详细的野外和室内工作,观察到了大量的早期构造变形.由于混杂岩中刚性的岩块与剪切基质物理性质的差异,刚性岩块(透镜体)通常只在边缘发生变形,出现与围岩一致的产状.在野外的观测中发现,地幔岩(包括构造橄榄岩和豆荚状铬铁矿)透镜体的边缘,蛇纹岩化后形成的线面理与片麻岩是一致的;而在大型的橄榄岩岩块的内部,所观测到的面理、线理与片麻岩围岩呈大角度相交^[8].较新鲜地幔岩样品的显微观察表明没有经历诸如围岩所具有的麻粒岩相、角闪岩相的变质改造,而是主要表现为蛇纹岩化或者绿泥石化的热液交代或者低温蚀变改造的特点.地幔岩中所观察到的包括橄榄石拉长、铬铁矿拉分破碎等高温变形与典型蛇绿岩完全一致,是大洋侧向扩张的深部表现,说明其形成于快速扩张洋脊之下;部分豆荚状保留有典型的岩浆结构和构造,包括豆状、豆壳状等结构构造,在野外也观察到方辉橄榄岩中有未变形的纯橄岩和辉石岩侵入,说明遵化蛇绿岩的地幔岩位于一个岩浆较强烈活动的位置,后期的岩浆活动逃过了强烈的地幔层次高温塑性变形.高温塑性侧向剪切变形和强烈的岩浆活动说明遵化蛇绿岩形成于快速扩张的洋脊,类似阿曼蛇绿岩.

保留有早期变形构造的遵化蛇绿岩残片说明新太古代末以大洋扩张为标志的板块运动已经出现,而构成蛇绿岩组分以构造透镜体形式出现在强烈剪切变形的陆壳物质中,则是板块碰撞聚合的证据.遵化蛇绿岩围岩的显微构造表现为角闪岩相-麻粒岩相的变形叠加了绿片岩相条件下的糜棱岩化变形改造,反映的是古洋壳构造侵位到陆壳之上后以蛇绿混杂岩的形态从中部地壳向上地壳抬升的构造运动过程.

致谢 参加野外工作的还有北京大学地球与空间科学学院地质学系的刘志强、陈征;电子探针数据由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室电子探针实验室舒桂明分析测得.

参 考 文 献

- 1 Hsu K J. Principles of mélangé and their bearing on the Franciscan-Knoxville paradox. *Bull Geol Soc Am.* 1968, 79: 1063
- 2 Hsu K J. Melanges and their distinction from olistromes. *Soc Econ Pal Min Spec Publ.* 1974, 19: 321
- 3 Raymond L A. Melanges: Their nature, origin, and significance. *Geol Soc Am Spec Publ.* 1984, 198: 1
- 4 Cloos M. Flow melanges and the structural evolution of accretionary wedges. *Geol Soc Am Spec Publ.* 1984, 198: 71
- 5 Nicolas A. Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. 1~252
- 6 Stephen J E, et al. New insights concerning the influence of water during the formation of podiform chromitite. In: Dilek Y, et al. eds. *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program: Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper 349*, 2000. 139
- 7 Li J H, et al. Archean podiform chromitites and mantle tectonites in ophiolitic mélangé, North China Craton: A record of early oceanic mantle processes. *GSA Today*, 2002, 12(7): 4
- 8 黄雄南,等.冀东遵化新太古代蛇绿混杂岩带岩石学与构造特征——古板块构造运动的证据. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(2): 200
- 9 伍家善,等.中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化.北京:地质出版社,1998. 43~157; 195~196
- 10 张贻侠,等.冀东太古代地质及变质铁矿. *中华人民共和国地质矿产部地质专报-区域地质*, 第6号.北京:地质出版社,1986. 8~9
- 11 白文吉,等.华北地块岩石圈构造演化与镁铁-超镁铁杂岩及矿化特征.北京:地震出版社,1993. 198~210
- 12 中国地质科学院地质矿产所岩石研究室编著.含铬铁矿超基性岩岩体类型及铬铁矿成矿规律.北京:地质出版社,1976. 129~133
- 13 李江海,等.豆荚状铬铁矿:古大洋岩石圈残片的重要证据.

- 地学前缘, 2002, 9(4): 235
- 14 Nicolas A, et al. Mechanisms of flow in naturally and experimentally deformed peridotites. *Am J Sci*, 1973, 273: 853
 - 15 Timon F, et al. Crystallographic preferred orientations and misorientations in some olivine rocks deformed by diffusion or dislocation creep. *Tectonophysics*, 1999, 303: 1
 - 16 胡 玲. 显微构造地质学概论. 北京: 地质出版社, 1998. 73~79
 - 17 Johnston W D Jr. Nodular, orbicular, and banded chromite in northern California. *Economic Geology*, 1936, 31: 417
 - 18 Ahmed A H, et al. Petrological characteristics of podiform chromitites and associated peridotites of the Pan African proterozoic ophiolite complexes of Egypt. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(1): 72
 - 19 Matveev S, et al. Role of water in the origin of podiform chromitite deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 235
 - 20 Holtsman B. Gauging stress from mantle chromitite pods in the Oman ophiolite. In: Dilek Y, et al. eds. *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*: Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper 349, 2000. 149
 - 21 Zhou M F, et al. Crystallization of Podiform chromitites from silicate magmas and the formation of nodular textures. *Resource Geology*, 2001, 51(1): 1
 - 22 Arai S, et al. Possible Sub-Arc origin of Podiform Chromitites. *The Island Arc*, 1995, 4(2): 104
 - 23 Nicolas A, et al. Chromite-rich and Chromite-poor Ophiolite: The Oman case. In: Peters T J, et al. eds. *Ophiolite Genesis and Evolution of the Oceanic Lithosphere*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. 261



国家自然科学基金研究专著

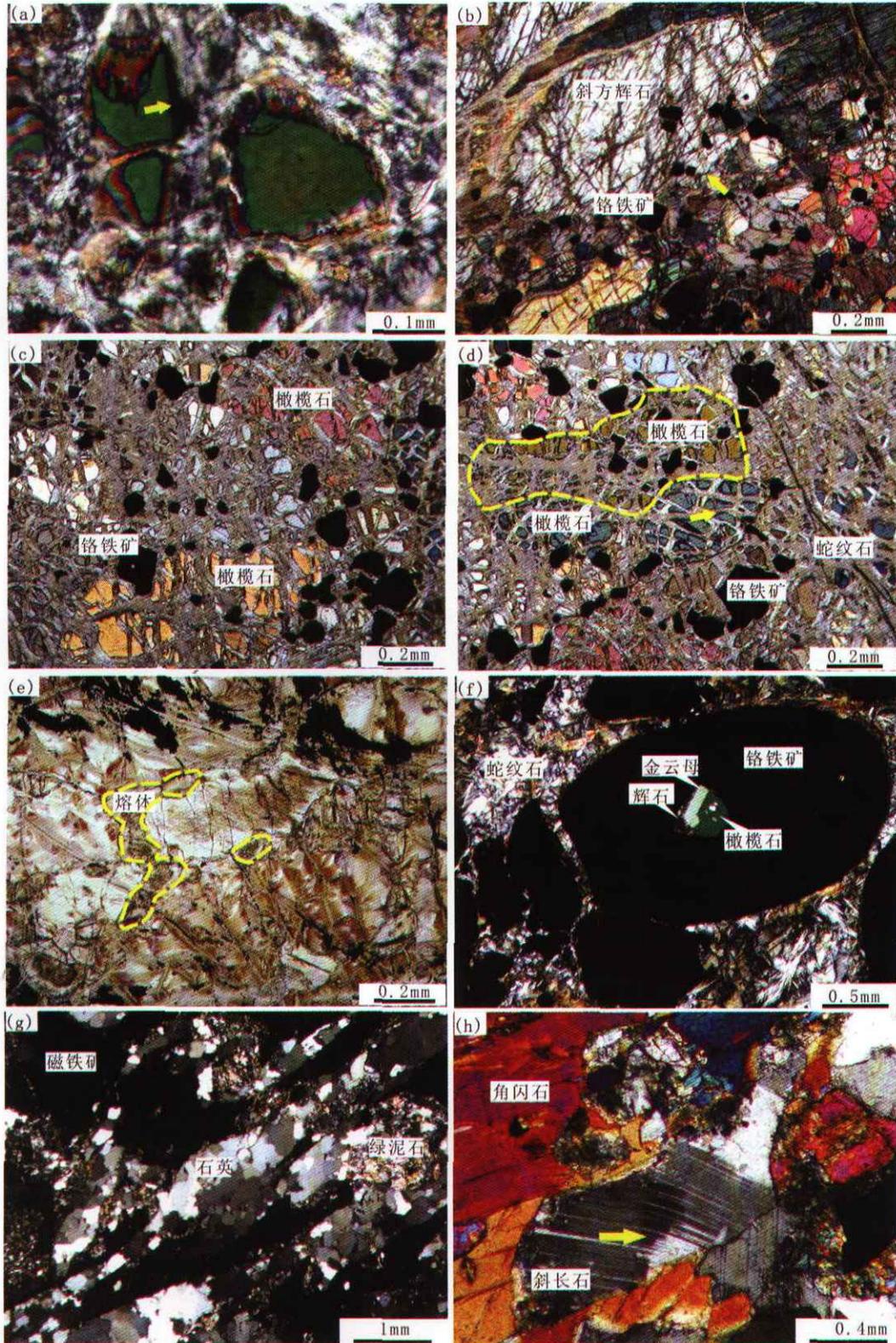
《变域传热发汗控制理论》杨学实 编著

北京大学出版社 定价: 40.00 元

本书分为八章, 第一章为数学模型, 内容中回顾了固定域热传导, 讨论了变域热传导和相变传热数学模型之间的关系; 给出了变域传热发汗开环控制和闭环控制模型, 以及固定域温度控制模型和变域边界控制模型、多维模型、发汗剂为不可压缩模型和可压缩模型等, 第二章为一维变域传热发汗冷却控制数学模型的数值方法和数学仿真研究. 第三章为二维和三维模型的数值方法和数学仿真研究. 第四章是发汗剂为可压缩气体的变域传热发汗冷却控制数值方法和数学仿真研究. 第五章为上述模型的数学特性和数学定理证明. 第六章为控制特性研究. 第七章为试验研究. 第八章为应用研究.

本书是从事控制理论研究, 尤其从事分布参数控制理论研究的专家学者的研究参考书; 也是大学教授、研究生、大学生以及防热设计工程师和控制设计工程师从事教学、研究和气动力学防热工程设计和

控制设计的重要参考.



图版I 遵化新太古代蛇绿混杂岩及其围岩的显微构造变形照片

(a) 原生粒状构造的纯橄岩中, 橄榄石出现扭折带 (如箭头所指); (b) 侵入纯橄岩中的辉石岩脉, 粗粒辉石残斑边部出现细粒动态重结晶的辉石颗粒 (如箭头区域); (c) 橄榄岩等粒镶嵌构造, 橄榄石近等粒紧密镶嵌, 颗粒边界呈弧形, 呈现扩散蠕变特征, 粒间的铬铁矿平行分布; (d) 强烈塑性变形方辉橄榄岩的板状镶嵌构造, 橄榄石呈拉长板状 (虚线圈内) 和菱形 (箭头区域); (e) 在方辉橄榄岩中, 粒状变晶镶嵌的橄榄石和辉石粒间出现熔体 (虚线圈起的部分), 岩石蛇纹岩化, 矿物为蛇纹石假象; (f) 豆状结构铬铁矿内部有包体矿物; (g) 磁铁石英岩出现石英条带构造、S-C 组构; (h) 层状斜长角闪岩的斜长石为拉长形, 普遍发育机械双晶和扭折带 (如箭头所指)