



大青山高级变质岩中复晶石英条带成因的 显微构造和流体包裹体证据

刘正宏* 徐仲元 王可勇

(吉林大学地球科学学院, 长春 130061)

摘要 大青山高级变质岩中复晶石英条带是地壳深部变形的特征性显微结构, 记录了地壳深部变质变形作用信息. 边界平直的复晶石英条带平行片麻理分布、延伸稳定, 穿切周围其他矿物颗粒, 内部包有透镜状、定向排列的细粒围岩矿物颗粒, 条带末端经常出现分叉现象. 流体包裹体分析结果表明, 复晶石英条带中流体包裹体类型复杂, 分布不均, 它们无论在成分和物理条件方面与麻粒岩相条件下捕获的包裹体明显不同. 依据显微构造和流体包裹体分析, 复晶石英条带是富 SiO_2 流体沿着平行片麻理的显微裂隙充填形成的, SiO_2 来源于变形岩石内部. 流体存在对岩石流变特征、破裂作用和石英条带形成起着重要的作用.

关键词 复晶石英条带 流体包裹体 显微构造 大青山

复晶石英条带是由许多矩形或近似于矩形的石英颗粒定向排列构成的, 通常只有 0.3~0.6mm 宽, 延伸稳定, 边界平直. 它们常常发育在早前寒武纪高级区韧性变形带内, 是高级变质岩中最常见、最重要的结构之一. 研究其显微构造特征、成因机制和演化过程对探讨早前寒武纪高级变质区和深部地壳构造动力学特征具有重要的科学意义. 为此, 许多构造地质学家从显微构造分析方面对复晶石英条带的显微构造特征、形成环境和成因机制进行了研究和探讨 [1~6]. 但是, 到目前为止对其成因机制和形成条件仍然没有统一的认识, 存在很大分歧, 主要有三种不同的成因观点: (1) 原始成分层变质变形观点, 认为高级片麻岩中复晶石英条带是原始富含石英的成分层或其他石英集合体变形形成的, 先有成分层后有石英条带 [1,2]; (2) 沿着剪切裂隙扩散模式, Mackinnon 等 [3] 研究了石英条带显微构造特征, 提出了沿着剪切裂隙的扩散模式; (3) 高温晶体塑性变形观点, 认为复晶石英

条带是麻粒岩相条件下石英晶体塑性变形作用形成的, 是高温糜棱岩中特有显微构造 [4~6], 目前大多数构造地质学家持有这种观点. 但是, 这种观点无法解释 2 个问题: 组成复晶石英条带的单个晶体颗粒的高应变能外形(呈拉长形态)和晶内无应变组构之间矛盾现象; 为什么大的石英条带内部含有大量周围矿物的包体和尾端出现分叉现象.

大青山高级变质岩中复晶石英条带主要发育在早前寒武纪韧性变形带内, 是由地壳深部构造层次上剪切变形作用形成的构造形迹. Li 等 [6] 对该区早前寒武纪变质岩中韧性变形带进行了研究, 认为复晶石英条带是麻粒岩相条件下石英晶体塑性流动变形的结果, 是高温糜棱岩中特征性的显微结构. 尽管如此, 对其成因问题仍然没有得到圆满解释, 为了查明复晶石英条带形成过程、形成条件和成因机制, 作者进行了显微构造和流体包裹体分析和研究, 在此基础上, 提出复晶石英条带系富 SiO_2 流体沿微裂隙充

填形成的认识。

1 区域地质构造背景

大青山位于华北地台北缘西段阴山断隆上,是我国前寒武纪高级变质岩最发育的区域之一。除了在该区南侧东部发育少量古元古界美岱召岩群的浅变质岩外,主要由一套深变质的麻粒岩系、孔兹岩系、黑云角闪斜长片麻岩岩系和各种类型变质深成岩组成(图 1)。麻粒岩系由各种类型麻粒岩、辉石斜长片麻岩和磁铁石英岩组成,其原岩为一套铁镁质-长英质火山沉积岩系。孔兹岩系由榴云片麻岩、石墨片麻岩、透辉斜长片麻岩、透辉大理岩和厚层白云质大理岩组成,分布在研究区中部,呈构造平行化条带与麻粒岩系的岩性条带呈“互层”产出,但是在局部受后期地质作用改造破坏较弱的部位上,仍然可以见到孔兹岩系角度不整合覆盖在麻粒岩系之上。黑云角闪斜长片麻岩系由斜长角闪岩、黑云角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩组成,呈构造岩性条带或构造透镜体与孔兹岩系和麻粒岩系相间产出。变质深成岩主要包括:太古代紫苏花岗质片麻岩、英云闪长质-花岗闪长质片麻岩;古元古代造山期后钾质花岗岩,呈岩株侵入在东西向构造带内,没有遭受强烈变质变形作用改造。

高级变质杂岩遭受了多期变质变形作用改

造 [6~11], 构造样式十分复杂。根据变形作用特点、构造要素切割关系,将早前寒武纪变形作用分为三期:早期近水平塑性剪切流动变形发生在地壳深部的麻粒岩相条件下,形成近水平叶理、线理和层间流动褶皱构造;中期为南北向强烈挤压变形作用,形成近东西方向的陡倾韧性变形带;晚期为由北向南斜向逆冲变形作用,在局部形成小规模的逆冲型韧性变形带。

中期的南北向强烈挤压变形作用形成的东西向地壳深部层次陡倾韧性变形带,叠加和改造了早期构造,变形带之间保存有早期近水平构造形迹(图 2)。变形带主要分布在不同地质体接触带附近或高级变质杂岩内部,其规模大小不一,小者只有几米-几十米宽,大则可达 3~4 km 宽(图 1, 2)。韧性变形带呈高角度向北倾或向南倾,倾角为 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。变形带内部发育陡倾叶理、矿物拉伸线理、不对称流动褶皱和 S-C 组构等变形组构。新生的陡倾叶理主要由矿物定向排列和复晶石英条带构成,同构造矿物组合为褐绿色角闪石+斜长石+单斜辉石为特征,局部在角闪石边部有细粒紫苏辉石形成,这说明变形时的温压条件相当于角闪岩相-角闪麻粒岩相,角闪石-斜长石矿物对的温度在 $575\sim 690^{\circ}\text{C}$ 之间,大致反映了东西向陡倾叶理带形成时的温度环境。

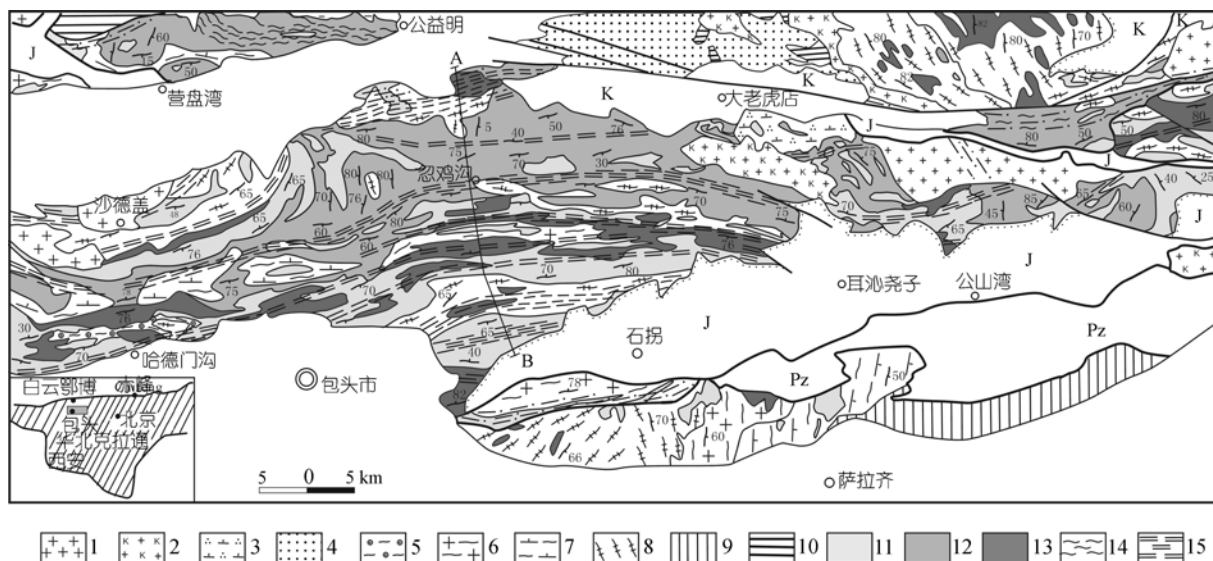


图 1 大青山地区前寒武纪地质构造图

1. 海西期-印支期花岗岩; 2. 古元古代钾长花岗岩; 3. 古元古代含紫苏石英闪长岩; 4. 新太古代 TTG 岩系; 5. 石榴花岗片麻岩; 6. 眼球状花岗质片麻岩; 7. 紫苏石英闪长片麻岩; 8. 紫苏花岗质片麻岩; 9. 古元古界美岱召岩群; 10. 新太古代色尔腾山岩群; 11. 孔兹岩系; 12. 黑云角闪片麻岩; 13. 麻粒岩; 14. 韧性变形带; 15. 地壳深部韧性变形带; K 示白垩系; J 示侏罗系; Pz 示古生界

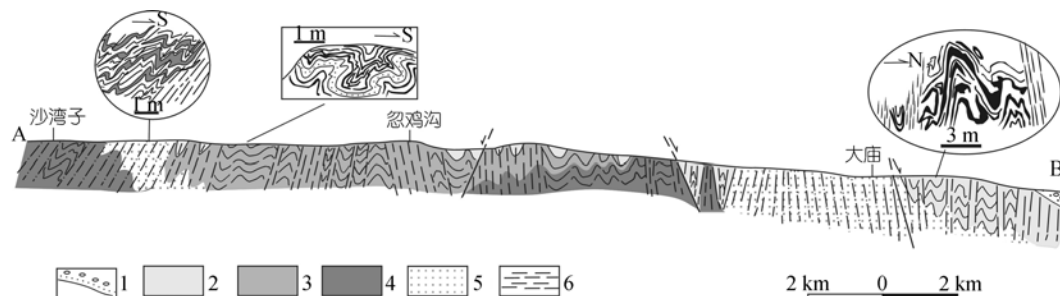


图 2 沙湾子一大庙东西向陡倾韧性变形带剖面图

1. 侏罗纪砾岩; 2. 孔兹岩系; 3. 黑云角闪片麻岩; 4. 麻粒岩; 5. 紫苏花岗片麻岩; 6. 韧性变形带

复晶石英条带是东西向陡倾韧性变形带内的特征性变形组构, 发育在遭受了强烈剪切变形的长英质片麻岩、石榴长英质片麻岩和浅色麻粒岩中. 在宏观上岩石发育条带或条纹状构造、叶内不对称流动褶皱、不对称拉断构造和矿物拉伸线理, 表现出强烈塑性流动变形特征. 但是, 在微观上, 除了复晶石英条带和少量长石残斑外, 长石和其他暗色矿物表现为细粒多边形结构, 而晶内变形组构不发育, 显示出地壳深部高温变形特征. 为了研究复晶石英条带变形特征和成因机制, 对研究区北部沙湾子一大庙地区韧性变形带中石榴长英质糜棱岩(B5402-2, 3)和紫苏长英质糜棱岩(B36-1)进行了显微构造和流体包裹体研究.

2 复晶石英条带显微组构

2.1 条带形态组构特征

复晶石英条带是由多个近于矩形石英颗粒首尾相连构成, 平行于岩石中陡倾叶理延伸, 条带通常只有 0.3~0.6 mm 宽, 长度可达几厘米, 长宽比一般大于 50:1(图 3). 条带内部石英颗粒呈矩形, 长宽比在 4:1~10:1 之间, 多数晶体内部变形组构不发育, 均匀消光, 但是少数颗粒内部发育有变形纹和变形条带等组构, 可能是后期变形叠加的结果. 尽管石英晶体内部变形组构不十分发育, 但是显示出明显的结晶优选方位, 石英 C 轴最大的优选方位与 Y 轴一致, 这一点与其他高级区石英条带组构相似^[3,4]. 在发育石英条带的片麻岩中, 几乎所有石英颗粒都集中在条带中, 说明石英主要是来自变形岩石的自身.

复晶石英条带之间为不含石英的长石域, 主要由细小均匀多边形长石构成, 粒度在 0.3~0.4 mm 之间, 颗粒之间呈三边平衡结构(图 3(a)), 表现出高温动态重结晶特征. 此外, 在细小均匀长石颗粒之间还

残留有透镜状长石残斑, 粒度在 1.5~2 mm 之间, 边界不规则, 晶内变形组构发育, 这些特点表明了岩石经过了强烈高温变形改造.

2.2 条带边界特征和内部包体

复晶石英条带的边界从平直到弧形、扇形, 形成了条带与非石英域之间的明显边界. 在平直边界的部位上可以见到条带穿切与之相接触的其他矿物颗粒(图 3(c), (d)), 尤其是在条带终端或细窄部位上, 它们经常从长石晶体中部穿过, 但是条带两侧长石并没有发生明显位移, 表明了石英条带是沿着膨胀裂开显微裂隙贯入. 大多数条带终端分叉, 形成了 2 个细的分枝(图 3(a), (d)), 穿切到其他矿物之中. 但是在部分条带中部也可以出现细小分叉, 与宏观上的岩脉特征十分相似, 其形态为锥型, 延伸不远就尖灭.

在大多数复晶石英条带内部具有长石、辉石、角闪石和黑云母等其他矿物包体, 其成分与周围岩石中麻粒岩相矿物组合相似. 这些包裹体的存在表明了这些石英条带不可能是由石英颗粒塑性拉长形成的, 是由流体贯入形成的. 包体粒度细小, 其形态可以是等轴状或长透镜状, 呈定向排列(图 3(b)), 与石英条带的长边和岩石中叶理一致. 这些包体成分和优选方位特征表明复晶石英条带在区域麻粒岩相变质变形作用晚期或之后形成的.

3 复晶石英条带流体包裹体特征

3.1 流体包裹体类型、均一温度和盐度

为了研究这些复晶石英条带成因和形成条件, 对这些石英条带中发育的流体包裹体进行了系统分析和研究. 条带石英晶体中主要发育四种类型包裹体(图 4), 分别为: CO₂ 包裹体; H₂O-CO₂ 包裹体; 含子

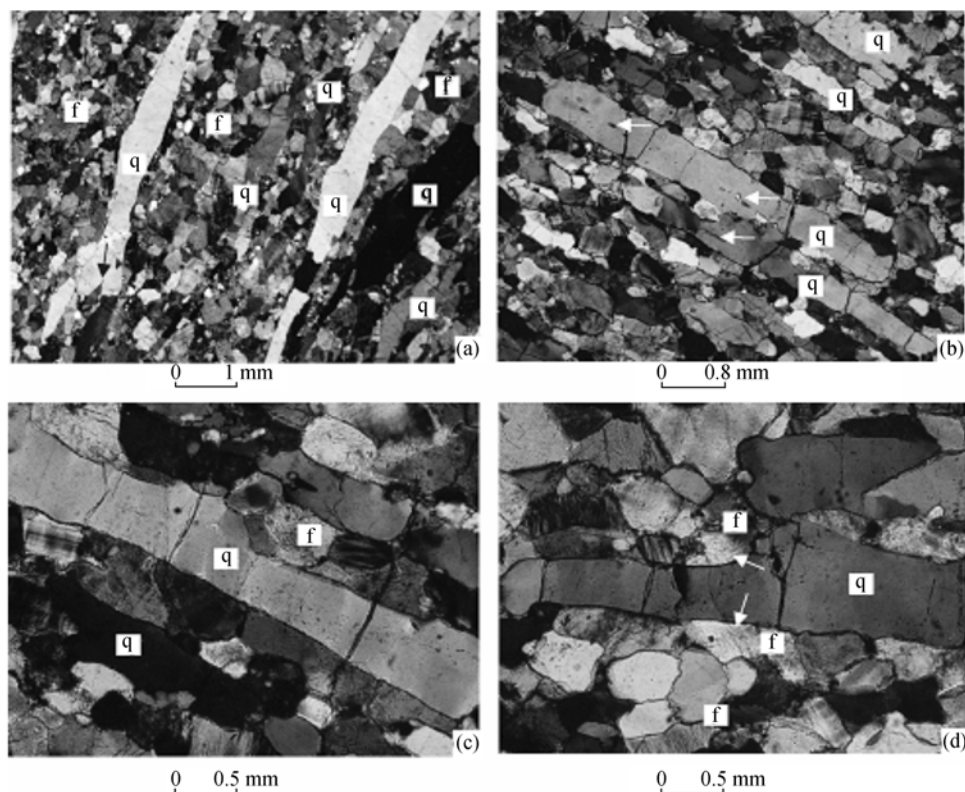


图3 韧性变形带中石榴长英质糜棱岩中复晶石英条带显微组构特征

(a) 复晶石英条带分叉(箭头)和细粒长石域(f 为长石, q 为石英), 条带呈均匀消光, 无晶内变形组构, 而周围长石为细粒多边形结构; (b) 复晶石英条带内含有周围其他矿物包体; (c) 边界平直石英条带, 发育垂直显微裂隙; (d) 石英条带穿切长石颗粒和膨胀裂隙

矿物三相包裹体; 气液两相包裹体。从性质上看它们大多属于成群分布的原生包裹体, 次生包裹体发育较少, 故在测温 and 成分分析中没有研究。

(1) 气液两相包裹体(图 4(d)), 气液比一般在 10%~20%之间。包裹体形态规则, 多为椭圆状, 大小在 5~15 μm 之间, 个别可达 20 μm ; (2) 富 CO_2 包裹体(图 4(a)), 其中 $V_{\text{CO}_2\text{g}}\%$ 在 85%~90%, 大小在 10 μm 左右; (3) CO_2 包裹体(图 4(b)), 由液相 CO_2 和气相 CO_2 两相组成, $V_{\text{CO}_2\text{g}}/V_{\text{CO}_2}\%$ 在 10%~15%, 形态为不规则状或椭圆状, 大小一般为 7 μm ; (4) 含子矿物三相包裹体(图 4(c)), 它是石英条带内部分石英颗粒中主要类型的包裹体, 气液比较低, 一般为 5%~10%, 固相子矿物主要为石盐, 立方体或菱面体、无色, 该类包体形态多为不规则状、多边形, 大小一般在 5~15 μm 。

对石英中发育的各种不同类型包裹体进行了均一法和冷冻法测温研究, 结果表明气液两相包裹体均一温度主要集中在 260~320℃之间, 温度峰值呈双

峰分布, 分别在 260~280℃和 300~320℃之间, 冰点温度在 5.2~10.1℃, 平均为 8.8℃。根据盐度计算公式^[8], 计算热液体系盐度值在 11.8%~14.04wt%NaCl¹⁾。依据NaCl-H₂O体系的温度、盐度、密度关系相图^[8], 确定流体密度为 0.88~0.93 g/cm³。

含子矿物三相包裹体均一温度变化范围较大, 在 280~400℃之间, 具有两个峰值, 分别集中在 300~320℃之间和 380~400℃之间。依据NaCl子矿物消失温度^[10], 估算热液体系盐度值在 36.41%~45.64wt%NaCl。富 CO_2 两相包裹均一温度集中在 315~341.5℃之间, 热液体系盐度值为 8.72wt%NaCl, 密度为 0.671 g/cm³, 其密度低于麻粒岩相条件下形成的流体包裹体。

这些包裹体在石英颗粒中分布不均匀, 根据含有包裹体类型不同, 将组成石英条带中的石英颗粒分为三种类型: 一是以含 CO_2 包裹体为主的石英颗粒; 二是以含子矿物三相及气液两相包裹体为主的

1) wt%为质量百分数, 下同

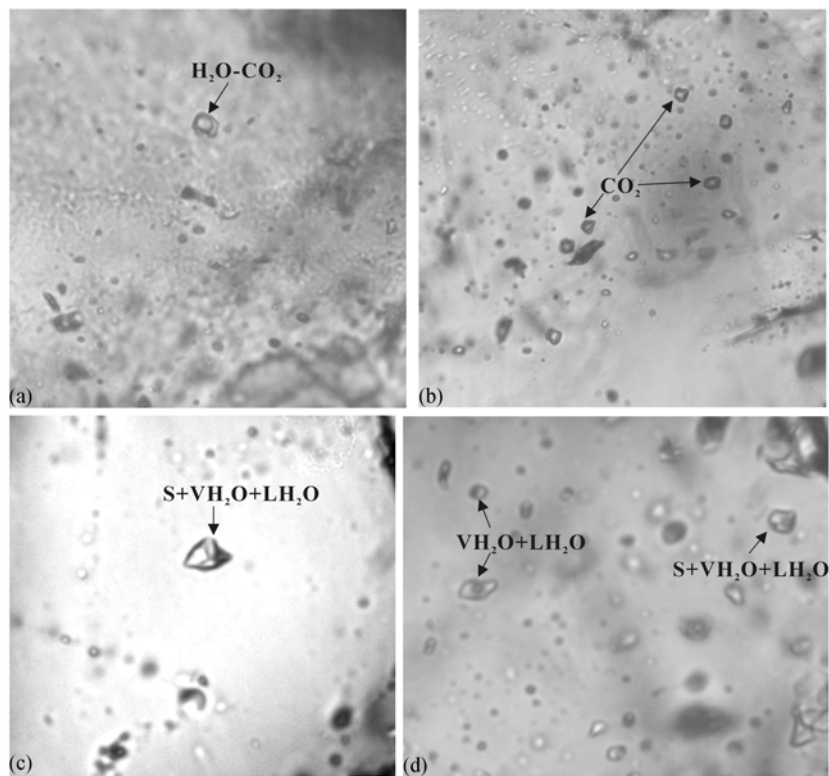


图 4 石英条带中流体包裹体显微照片

(a) $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体; (b) CO_2 包裹体; (c) 含子矿物三相包裹体; (d) 气液两相包裹体和含子矿物三相包裹体

石英颗粒; 三是既有二氧化碳包体也有含子矿物三相及气液两相包裹体. 含子矿物三相及气液两相包裹体颗粒往往发育在以二氧化碳包裹体的石英颗粒之间. 复晶石英条带之间的长石颗粒中也发育有二氧化碳包裹体, 其特征与石英颗粒中的包裹体特征相一致, 据此推断, 含有二氧化碳包体的石英颗粒形成应早于含子矿物三相及气液两相包裹体的颗粒.

3.2 流体包裹体成分分析

对上述不同类型的流体包裹体成分进行了分析, 气液两相包裹体中气相部分是以 H_2O 为主(图 5), 其平均含量为 $95.4 \text{ mol}\%$ ¹⁾; 在少部分包裹体中含有一定量 CO_2 , 最高可达 $12.84 \text{ mol}\%$, 此外还有少量的 H_2S , CO , N_2 和 CH_4 等成分. 而液相部分也是以 H_2O 为主, 其平均含量为 $95.4 \text{ mol}\%$, 还有少量液相 CO_2 , 其余成分为 CH_4 , CO , N_2 , HCO_3^- 和 SO_4^{2-} .

在原生含 CO_2 包裹体中的气相部分是以 CO_2 为主(图 5), 其平均含量为 $81.36 \text{ mol}\%$, 而 H_2O 含量在 $6.09\%\sim 8.13 \text{ mol}\%$ 之间. 但是, 液相部分主要是以 H_2O

为主, 其含量在 $94.84\%\sim 97.3 \text{ mol}\%$, 而液相中 CO_2 含量少于 $5 \text{ mol}\%$. 此外, 还有一些单相 CO_2 包体.

上述分析结果表明了复晶石英条带主要有两种不同成分流体包裹体, 一是不含 CO_2 的盐水溶液, 含盐度较高, 另一种是富含碳质的溶液或是单相 CO_2 , 其溶液特征与前一种明显不同, 表明石英形成于成分不均匀溶液体系或不是同期矿物晶体.

3.3 流体包裹体的地质意义

徐学纯^[10]和卢良兆^[11]对该区韧性变形带外部麻粒岩和孔兹岩中流体包裹体进行了详细研究, 并且将流体包裹体分成三种类型, 一种是碳质流体包裹体, 碳质含量在 $70\%\sim 90 \text{ mol}\%$, 密度在 $1.00 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$, 是麻粒岩相峰期变质作用的产物; 另一种 H_2O 溶液两相包体, 溶液以 H_2O 为主, 密度一般在 $0.93\sim 0.96 \text{ g/cm}^3$ 之间, 与峰期减压之后在 $500\sim 700^\circ\text{C}$, $0.5\sim 0.6 \text{ GPa}$ 条件下的深熔岩浆活动有关; 第三种类型是 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$, 是前两种溶液混溶作用的结果. 本次研究结果表明复晶石英条带流体包裹体类型复杂,

1) $\text{mol}\%$ 为摩尔百分数, 下同

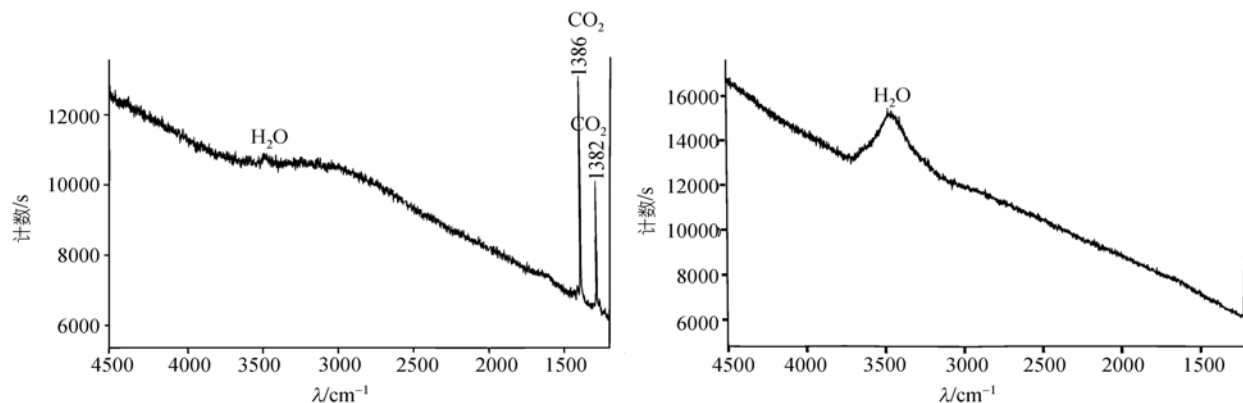


图5 复晶石英条带流体包裹体激光拉曼谱图

测试单位: 吉林大学地球科学学院地质流体实验室. 测试仪器: Renishaw-system 1000 激光拉曼光谱, 514.5 nm 激光器;
扫描范围 $4500\sim 850\text{ cm}^{-1}$, 积分时间 $80\sim 120\text{ s}$, 粒度 1 cm

分布不均匀. 它们具原生性质及成群发育特征, 是石英条带形成过程中捕获的, 这也反映了沉淀石英流体不均匀特点或者这些石英颗粒不是同一期的产物. 以往研究均已表明麻粒岩相条件下常捕获富 CO_2 及 CO_2 包体, 少见以水溶液为主的包体^[11~16]虽然复晶石英条带中部分的石英颗粒也是以富 CO_2 及 CO_2 包体为主, 但是其密度已经远远低于在麻粒岩相的 CO_2 包裹体, 表明其非完全是麻粒岩相条件下的产物. 野外地质关系和显微构造特征也都表明区内东西向韧性剪切变形作用也是发生在区域麻粒岩相变质作用之后, 并且伴随有强烈深熔岩浆活动. 上述的特点表明组成复晶石英条带中的石英颗粒可能不是同一期的产物, 部分富含 CO_2 气液两相包裹体的石英颗粒, 可能是早期麻粒岩相石英晶体的残留. 由于受后期变形作用改造, 使富含 CO_2 气液两相包裹体的密度明显降低. 这些早期残留石英晶体呈塑性状态混在富含 SiO_2 流体中, 与后期石英颗粒结晶在一起, 形成复晶石英条带.

4 复晶石英条带的成因和流体作用

许多构造地质学家把复晶石英条带成因解释为晶体强烈塑性流动变形结果^[1,2,4,5,6], 认为平直边界是由于颗粒边界迁移形成的^[4], 但是不能解释石英条带边界穿切相邻边部其他矿物颗粒, 以及内部细小矿物颗粒包体和条带尾端分叉形态. 根据上述显微构造和石英晶体内部流体包裹体特征, 复晶石英条带是由富含 SiO_2 流体沿着平行于叶理的显微膨胀裂隙贯入形成的, 主要证据如下: (1) 复晶石英条带形态与宏观岩脉特点相同, 尤其是尾部或条带中部出现

了明显分叉现象(图 3(a), (d)), 这种形态特征只有富含 SiO_2 流体沿着裂隙贯入才能形成, 而塑性拉长石英条带不可能造成分叉现象; (2) 内部发育有周围矿物颗粒包体, 并呈定向排列, 与石英条带延伸方向和岩石叶理一致, 这是流体在贯入过程中裹入了部分周围矿物晶体的结果; (3) 条带穿切了周围的矿物颗粒, 并且两侧颗粒没有明显的位移, 所以这些显微裂隙为膨胀裂隙; (4) 石英晶体内部富含 H_2O 和 CO_2 和包裹体, 说明石英条带形成过程中有大量流体存在; (5) 组成复晶石英条带的单个晶体呈粗大的矩形, 长宽比大于 $4:1$, 但是晶体内部呈均匀消光, 这是由于富含 SiO_2 流体在限定显微裂隙内结晶作用结果.

流体存在对岩石流变特征、破裂作用和石英条带形成起着重要的作用. 流体压力可以通过水解软化作用抑制和降低岩石脆性行为^[14~28], 在另一方面流体压力可以通过降低有效压力增强岩石脆性行为, 通过应力腐蚀产生破裂作用. Hubbert等^[27]提出的水压致裂理论, 岩石中存在许多封闭的破裂、节理, 如果破裂和节理切过孔隙, 这些间隙范围内岩石的强度系数可能接近于 0, 要保持间隙区内岩石不发生破裂, 孔隙内的流体压力必需低于最小应力, 一旦流体压力高于该最小应力值时, 在破裂的尖端将出现张应力集中, 破裂迅速地扩展和生长. 岩石中这些显微裂隙产状与叶理一致, 沿着裂隙两侧滑移现象不明显, 在条带尾端经常出现分叉现象, 这些特征与宏观高压流体脉^[19]的特点非常相似, 表明这些裂隙是由高压流体作用产生的显微膨胀裂隙.

在含有复晶石英条带的强烈变形的片麻岩中, 石英都集中在条带中, 说明在石英条带形成过程中

SiO₂是来源于岩石本身,而没有外来的SiO₂加入.在变形过程中在应力和流体作用下,岩石中的石英组分通过流体活化、迁移,最终集中于显微裂隙中结晶沉淀,形成了复晶石英条带.

5 结论

大青山高级变质岩中复晶石英条带的显微构造特征和流体包裹体分析表明,这些石英条带是由富含 SiO₂ 流体沿着平行早期叶理的显微裂隙充填形成的.条带表现为平直边界和尾端分叉,穿切周围其他矿物,以及内部含有围岩矿物包体.裂隙成因模式可以圆满解释了复晶石英条带“高应变能”外形和晶内变形组构不发育这一相矛盾的显微构造现象,同时也表明了高压流体引起的脆性变形机制是地壳深部层次一种重要的显微变形机制.

流体包裹体是复晶石英条带形成环境的真实和客观的记录,分析结果表明发育在早前寒武纪高级区内复晶石英条带不是在麻粒岩相条件下形成的,而是与峰期减压之后在 500~700℃, 0.5~0.6 GPa 条件下韧性剪切变形有关.复晶石英条带成因和形成环境的确定对研究地壳深部层次岩石变形机制和变形历史具有重要意义.

在石英条带发育的岩石中石英矿物都集中分布在石英条带中,而在条带之间基本上不含有石英颗粒,说明在石英条带形成过程中 SiO₂ 来源于岩石本身,而没有外来的 SiO₂ 加入.构成复晶石英条带中的不同石英颗粒中流体包裹体成分的差别,表明石英颗粒可能是不同期次的矿物.

致谢 作者衷心感谢评审专家对论文提出的宝贵修改意见.

参 考 文 献

- Culshaw N, Fyson W. Quartz ribbons in high grade gneiss: modifications of dynamically formed orientations by oriented grain growth. *J Struct Geol*, 1984, 6: 663—668[DOI]
- Gower R, Simpson C. Phase boundary mobility in naturally deformed, high-grade quartz feldspathic rocks: evidence for diffusional creep. *J Struct Geol*, 1992, 14: 301—314[DOI]
- Mackinnon P, Fueten F, Robin P Y. A fracture model for quartz ribbons in straight gneisses. *J Struct Geol*, 1997, 19: 1—14[DOI]
- Hippertt J, Rocha A, Lana C, et al. Quartz ribbons in straight gneisses. *J Struct Geol*, 2001, 23: 67—80[DOI]
- Bochez J. Plastic deformation of quartzites at low temperature in an area of natural strain gradient. *Tectonophysics*, 1977, 39: 25—50
- Li S, Sun D, Yu H. Distributions of ductile shear zones and metallogenic prediction of the related gold deposits in the early Precambrian metamorphic rocks, mid-western Inner Mongolia (in Chinese). Changchun: Scientific and Technical Publishing House of Jilin, 1995. 20—70
- 李树勋, 孙德育, 于海峰, 等. 内蒙古中西部早前寒武纪高级变质岩系中韧性剪切带分布规律及成矿预测. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 20—70
- 金巍, 李树勋, 刘喜山. 内蒙古大青山早前寒武纪高级岩系特征和变质动力学. *岩石学报*, 1992, 8(3): 281—289
- 张文淮, 陈紫英. 流体包裹体地质学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 24—170
- 徐学纯. 内蒙古乌拉山地区麻粒岩相变质流体性状及其演化. *地质论评*, 1985, 38(5): 398—289
- 卢良兆, 懂永胜, 周喜文. 内蒙古兴和一桌资地区早前寒武纪孔子岩系岩石中流体包裹体的特征和成因. *岩石学报*, 2000, 16(2): 281—287
- 李树勋, 徐学纯, 刘喜山, 等. 内蒙古乌拉山区早前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1994. 85—102
- 耿元生, 沈其韩, 李荫清. 冀西北麻粒岩相花岗岩质片麻岩中矿物的流体包裹体特征及其地质意义. *岩石学报*, 1996, 12(2): 276—286
- 刘树文. 冀东高级变质作用流体演化. *岩石学报*, 1996, 12(1): 48—58
- Hollister L S. Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal-plastic deformation. *J Struct Geol*, 1990, 7: 737—750
- Leinefeld B, Olesch M. Imprint of different fluid generations on granulitic gneisses from central Dronning Maud Land, Antarctica. *J Geochem Expl*, 2000, (69-70): 349—352
- Ruggieri G, Gianelli G. Multi-stage fluid circulation in a hydraulic fracture breccia of the Larderello geothermal field (Italy). *J Volcanol Geother Res*, 1999, 90: 241—261[DOI]
- Fyfe W S. Fluids, tectonics and crustal deformation. *Tectonophysics*, 1986, 119: 29—36[DOI]
- Cox S F. Faulting process at high fluid pressures: an example of fault valve behavior from the Wattle Fault, Vitoria, Australia. *J Geophys Res*, 1995, 100 (B): 12841—12859[DOI]
- 邵世才, 何绍勋. 剪切带型金矿床中含金石英脉的一种可能成生机理. *大地构造与成矿学*, 1994, 18(2): 155—162
- Dipple G M. Fluid flow, mineral reactions and metasomatism. *Geology*, 1991, 19: 211—214[DOI]
- McCaig A M. Deep fluid circulation in fault zone. *Geology*, 1988, 16: 867—870[DOI]
- Meere P A. High and low density fluids in a quartz vein from the Irish Variscides. *J Struct Geol*, 1995, 17(3): 435—446[DOI]
- Sibson R H, Robert F, Poulsen K H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 1988, 16: 551—555[DOI]
- Deepak C, Srivastava, Sahay A. Brittle tectonics and pore-fluid conditions in the evolution of the Great Boundary Fault around Chittaurgarh, Northwestern India. *J Struct Geol*, 2003, 25: 1713—1733[DOI]
- Johnson E L, Hollister L S. Sydeformation fluid trapping in quartz: determining the pressure temperature condition of deformation from fluid inclusion and formation of pure CO₂ fluid inclusions during boundary migration. *Metamorph Geol*, 1995, 13: 239—249[DOI]
- Hubbert M K, Rubey W W. Roles of fluid pressure in mechanics of over thrust faulting. *AAPG Bulletin*, 1959, 70: 167—206
- 徐兴旺, 蔡新平, 王杰, 等. 流体构造动力学及其研究现状与进展. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 324—331