

超高压变质矿物岩石

——地球科学概论学习心得

中国科学技术大学少年班学院 黄瑞川 PB22000282

引言: 超高压变质 (UHPM) 矿物岩石, 自从 ChopinC 1984 在西阿尔卑斯发现变质的柯石英 (coesite) 并且论证了超高压变质作用以来, 高压-超高压变质作用是近 30 年来国际地质学界持续研究的热点与前沿。大陆地壳密度比地幔低, 能否俯冲到地幔深度? 大陆地壳如何俯冲到地幔深度, 又如何折返回来? 超高压变质岩石的研究对这两个问题起到了重要的作用。但由于本课程对于这一研究浅尝辄止, 基于结果的介绍, 引起了笔者的许多困惑, 也给笔者留下了很深的印象, 故选此课题撰写地球科学概论课学习心得。但碍于笔者几乎没有任何专业知识, 故只能尽可能搜集并阅读相关的论文, 并进行总结形成个人的见解, 通过心得来呈现。由于笔者的能力有限, 所理解的内容难免有错误存在。

困惑:

- 高温和高压的环境还有其他情况, 为什么超高压变质矿物的形成指向大陆地壳的俯冲? 为什么不是类似的形成高温高压环境, 比如说大洋板块俯冲和大陆板块碰撞。
- 为什么不能是在地幔中形成的物质通过另一些地质活动, 从而来到了地壳, 比如说火山爆发?
- 大陆深俯冲再返回, 其中的俯冲和返回过程是怎么样的?
-

柯石英与大陆地壳俯冲:

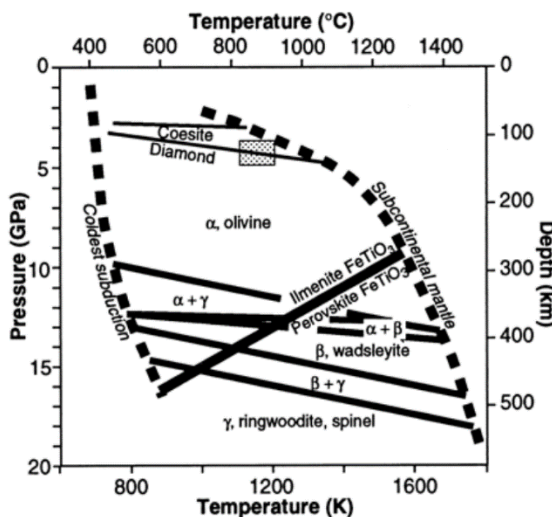


图 1. 一些超高压变质矿物相变与深度、温度的关系

柯石英是二氧化硅的高压晶型之一, 由 Cose 在 1953 年第一次合成与分析。Chao 等人于 1960 年在亚利桑那州的陨石坑中第一次发现了自然界中的柯石英。许多研究人员对柯石英的高压稳定域进行了研究, 排除了其在地壳岩石中存在的可能性, 除非在类似陨石坑的地方, 但也发现如果上地幔存在二氧化硅, 那么柯石英会是它的一种稳定相。

1984 年法国科学家 Chopin 首次在西阿尔卑斯地表发现超高压矿物柯石英, 基于该矿物的超高压变质特性, 提出大陆下地壳俯冲到 100 公里以下深度并折返回到地表的假说, 进而发展了大陆深俯冲理论。

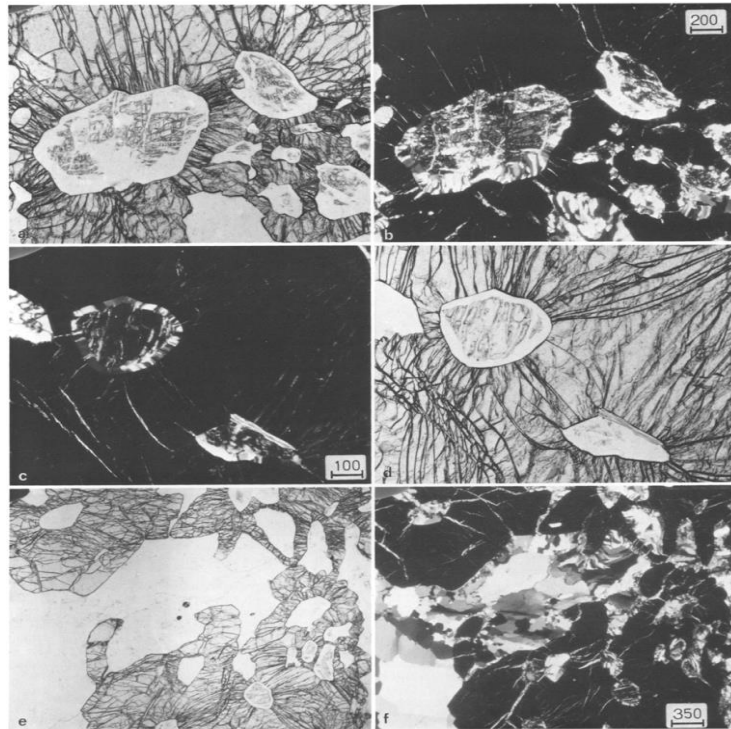


图 2. a-f 是样品在显微镜下的照片，以微米为单位的比例尺。a-b, e-d, 柯石英的痕迹部分倒转到石英，作为镁铝榴石的包裹体。注意包裹体形状不规则，缺乏优选去向和生长纹理（e、f 中同样），包裹体周围由石榴石的镜像断裂。石榴石中石英对榴辉石的取代结构以多晶石英沿包裹体边缘径向生长(e-d)和沿榴辉石解离裂隙发育(a-b)为特征。e-f 在石英伪晶（图片中心）的部分机制中存在柯石英，但在机制的其他地方却不存在（左下角）

Chopin 研究的样品是，石榴石、白云母、蓝晶石、滑石和金红石在未变形的多晶石英机制中处于结构平衡状态。石榴石含有部分倒置的柯石英包裹体与石英，导致石榴石主体在包裹体周围呈典型的径向开裂。这些现象表明柯石英在接近静压的条件下结晶，整个基体原本都应是柯石英。

而形成的超高压条件有以下证据：1) 纯镁铝榴石与游离二氧化硅、滑石的共存；2) 翡翠与蓝晶石的共存；3) 白云母的较高硅含量。并且水的活动性一定很低。滑石-白云母的稳定性和罕见的蓝闪石包裹体的存在，表明其形成的温度较低（约 700° C）。这说明低温梯度虽然本质上是短暂的，但可能会延续到地球的相当深的地方。

下面对于柯石英一类的 UHPM 岩石的形成条件作一个总结

- 1、**超高压**是 UHPM 岩石生成的必要条件之一。
- 2、**很高的压力-温度梯度**，即 dp/dT 很大，即超高压变质作用发生在压力急剧增加而温度变化较小（**温度也较低**）的环境中。
- 3、形成后保存在相对封闭的环境中，使其不易收活动性强烈的流体侵染。例如，在开放环境中含柯石英的榴辉岩可以逐渐退变为角闪岩或副片麻岩，如果不在封闭的环境中，很难看到大片出露的含柯石英新鲜榴辉岩。但这种说法仍存在一定的争议

考虑到大陆和海洋、地幔的平均密度差异，人们普遍认为洋壳可以俯冲到大陆或海洋板块下相当深的地方，而大陆则始终靠近地球表面。然后，人们意识到，海洋地壳对大陆地壳的逆冲是可能的，并且这种地质运动能够在大陆板块的边缘产生低温、高压的环境（这似乎可以解释超高温变质作用？）。此外，大陆碰撞引起的地壳增厚，如在我国青藏高原处，形成的深度高达 70 公里左右的地壳（似乎也是一个很好的解释）。但这都不太符合我们所观察到的现象，等一下我们再进行说明。大陆地壳可能被埋在 90 公里这样相当深的地方，且为了保持低温

与较大的温度梯度而必须迅速埋下,这意味着我们必须重新审视大陆地壳与海洋地壳、地幔之间的关系。

形成 UHPM 岩石至少有下面四种可能情形:

- 1、**陨石冲击坑**。就像 Chao 等人在自然界中第一次发现柯石英的陨石坑,但这显然十分罕见,而我们发现的 UHPM 岩石一般位于造山带,例如大别山与阿尔卑斯山,并不具有典型的陨石撞击特征。
- 2、**大洋板块俯冲消减带**。但这种俯冲带不太可能返回地表。并且大别-苏鲁 UHPM 带与表征大洋俯冲的蛇绿岩带并不共生。
- 3、**大陆板块碰撞**。陆-陆碰撞的过程十分复杂,且不太可能产生低温变质作用。
- 4、**大陆地壳俯冲与返回**。一个陆块俯冲到另一个陆块之下,在 80km 以下可产生超高压变质作用,成为“压、冷、干”的 UHPM 岩石形成的理想环境。如果它们快速上升回到地表,就形成了我们看到的 UHPM 岩石带。

大陆俯冲返回的动力学过程

对于这一问题并没有一个统一的答案,目前流行的有浮力驱动的羽流模型和楔形挤出模型(设想区域变质带剥露由俯冲板片与地幔楔之间狭窄的楔形角所驱动。据 Maruyama et al. (2010),楔形挤出模型提出了一个楔形粘性流体(区域变质带),其两边被下伏板块和上覆地幔楔所夹,并通过俯冲角变浅而挤出)等两类地质模型,但实际上建立的模型并不像这两种看上去这么简单,下面仅仅是选取一种详细模型进行大致简单了解,限于笔者水平也只能如此。

Flow modes in subduction channels

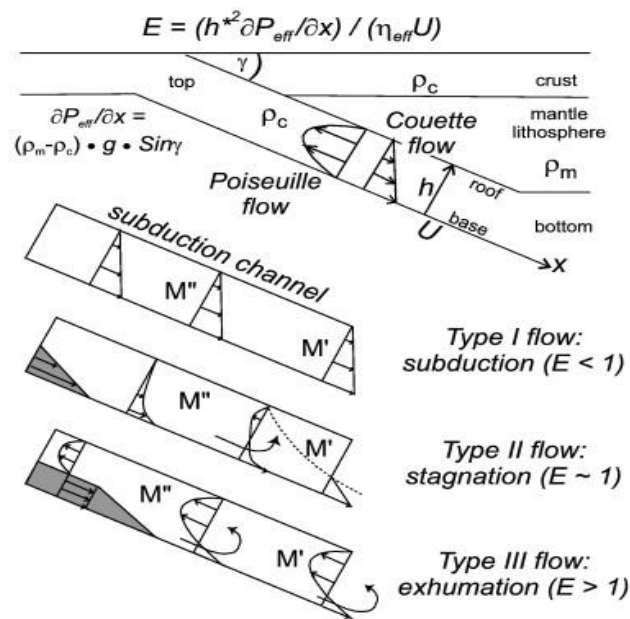


图 3. 挖掘数(exhumation number 这个词有点难翻译)定义 E 和相应的俯冲通道流动模式。俯冲壳的削弱和脱离触发了俯冲($E < 1$)向停滞($E \sim 1$)的转变;挖出($E > 1$)是由浮力增加(用有效压力梯度 $\partial P_{eff} / \partial x$ 表示)、通道厚度增加(h)、有效粘度减小(η_{eff})和俯冲速度减小(U)的累积效应触发的。灰色阴影表示俯冲的大陆内部地壳;M' 和 M'' 代表了俯冲通道中表现出相反行为的大陆边缘物质块。

俯冲通道的数值模型可以方便地用特征挖掘数 E 以及与超高压岩石埋藏和挖掘相关的相应流动模式(图 3)来解释。一阶动力学(图 3)可以用蠕变流动的润滑理论来近似,并用俯冲岩石圈阻力引起的向下通道 Couette 流之间的竞争来描述。由低密度俯冲地壳物质的浮力驱动的相反的向上通道 Poiseuille 流。这种竞争通过挖掘数 $E = (h^2 \cdot \partial P_{eff} / \partial x) / (\eta_{eff} U)$ 表示,这是一个由无量纲通道

流方程导出的力比。这里 $\partial P_{eff} / \partial x$ 是下通道的有效压力梯度(x 在下倾方向上

测量), U 是下板的俯冲速度, η_{eff} 是通道材料的有效粘度。参数 $h^* = (2[\eta_{\text{eff}}]U/[\partial P_{\text{eff}}/\partial x])^{1/2}$ 是用粘度和有效压力梯度的特征初始值[方括号]估计的通道厚度规模的度量;决定 E 的实际值将取决于特定问题及其不断发展的解决方案。 E 的第一个括号项测量二维俯冲通道单位长度的 Poiseuille 流力。对于具有变形壁且没有构造超/低压的通道, $\partial P_{\text{eff}}/\partial x \approx (\rho_m - \rho_c)g \sin \gamma$, 其中 γ 是通道倾角(图 3)。括号中的第二个项是单位通道长度的 Couette 牵引。

总结与展望

对于超高压变质矿物的研究已经十分深入,这种大陆地壳深俯冲后返回的观点也已经被大多数人所接受。现在人类已经在非撞击变质岩中发现存再斯石英的显微结构证据,这把大陆深俯冲折返的最大深度拓展到斯石英稳定域,也就是大于 350km 这一惊人的结果。但大陆深俯冲折返过程中的动力学过程仍然保留着其神秘的面纱,等待我们去揭下,展现自然的瑰丽神奇之美。

参考文献:

- [1] Chop in C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps, a first record and some consequences[J]. Contributions to mineralogy and petrology, 1984, Vol. 86 (2), p. 107-118.
- [2] C. Beaumont. Crustal structure: A key constraint on the mechanism of ultra-high-pressure rock exhumation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 30 September 2009, Vol. 287, Issues 1-2, Pages 116-129.