

文章编号: 1006-6616 (2000) 03-0063-06

# 超高压变质作用压力模型思考

胡宝群, 王方正, 肖 龙

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

**摘要:** 该文在研究地球内部压力的计算过程和超高压变质作用过程的基础上, 指出超高压变质作用的压力不仅包括静岩载荷压力, 还应包括构造超压和体系内部的相变增压, 并给出了超高压变质岩区的初步压力模型, 得出了超高压变质作用中压力与深度是非线性关系的认识。

**关键词:** 超高压变质作用; 相变; 构造作用

**分类号:** P588.33      **文献标识码:** A

## 0 引言

超高压变质岩的发现引起了地球科学家的广泛关注<sup>[1~5]</sup>, 成为20世纪末和21世纪初的研究热点。所谓超高压变质岩是指壳源的、含有柯石英和金刚石等超高压类矿物的岩石。目前认为其形成时的压力大于2.0~2.2GPa, 这正处在岩石圈中地幔的压力范围。这就给人们提出了一个问题, 它是如何到达地幔之中而后再如何折返到地表的? 为了解决这一问题, 人们提出了一系列的假设<sup>[2~5]</sup>, 但是每个假设都有一些与之相矛盾的事实, 这迫使我们不得不去思考: 金刚石和柯石英等超高压矿物的形成所需要的如此大的压力, 一定要到岩石圈中的上地幔那么深才能具备这种超高压环境吗? 这就是岩石圈中压力与深度的换算模型问题, 或压力组成模型问题。如果解决了这个问题, 将有利于超高压变质岩形成与折返等问题的解决。下面是对压力的计算问题从理论上进行的一些思考。

## 1 对现有压力模型的评述

现在常用的计算地球内部各点的压力是基于把地球内部某点处的压力理想化为密度的函数这一假定<sup>[6~10]</sup>:

$$\frac{dp}{dr} = -g\rho, \quad \text{其中 } g = \frac{GM(r)}{r^2}$$

式中  $g$  为重力常数,  $G$  为引力常数,  $r$  为半径 (即地球内某点与地心的距离),  $M(r)$  是半径为  $r$  范围内的地球质量,  $P$  是压力,  $\rho$  为密度。

收稿日期: 2000-06-15

基金项目: 教育部博士点基金项目 (1998年) 和国家自然科学基金项目 (编号: 49873009)

作者简介: 胡宝群 (1965—), 男, 中国地质大学岩石学专业在职博士生。

在计算压力梯度时,关键是密度( $\rho$ )的计算。密度是随深度的变化而变化的,因此,求压力梯度首先要推导出密度梯度。基于不同的假设条件,有不同的求密度梯度的方法。Williamson—Adams 密度梯度<sup>[6,7]</sup>公式就是著名的求密度的方法之一。在选定某一个密度与深度的关系式后,代入上述压力梯度公式中,即可求出压力与深度的关系式,并可做出相应的压力与深度关系曲线图。这种地球内部压力随深度变化的图表可见于许多相关的教科书中<sup>[6-10]</sup>。这些图表的共同规律是:从地表到地核,压力随深度变化曲线是复杂的;但在岩石圈深度内,压力与深度的关系近似为线性关系,压力梯度近似为 0.033GPa/km。

在计算地球内部的压力时,一般作绝热自压缩、成分均匀、相态不变等假设,同时还默认相态为固相并处于力平衡状态的前提条件。显然,这些假设与岩石圈中物质的组成、热状态及应力场不均匀的实际情况不完全相符,尤其是地壳中各构造单元的地温梯度,即热状态更是不同,化学和相态组成也是变化的。

有的文献虽然讨论了上地幔存在成分和相态的变化,偏离了均匀、绝热区这一假设,可能对密度计算产生影响,因此采用非绝热影响系数( $\delta$ )和非均匀系数( $\eta$ )来修正密度和压力计算<sup>[6,7]</sup>,但是没有针对岩石圈中广泛存在着各种化学反应而改变了各区域的化学和矿物组成,也没有根据岩石圈广泛存在的相变导致各区域的相态组成(有流体相存在)、热状态不均匀性、体系的性质等一系列经常变化的特点而设计出新的、适用于岩石圈范围内的压力计算公式(模型)。在偏离均匀、绝热区这一假设不大的情况下,用非绝热影响系数( $\delta$ )和非均匀系数( $\eta$ )来修正密度和压力计算公式是可行的;然而,事实是岩石圈远远偏离了全球压力计算时的假设条件,在岩石圈中用这种修正方法是否合理就值得怀疑。

若要求整个地球内部的压力时,仅为薄壳的岩石圈不作特殊考虑,可能不至于出现较大的误差;然而若要求岩石圈内(尤其是壳幔交换区和超高压变质岩区等特殊地区)的、较为精细的压力梯度,就必须考虑到岩石圈所特有的相变和组分变化,不仅要与地幔一样应考虑固相与固相、固相和熔体(液相)之间的相变,同时还要考虑有水等流体相的存在。

另外,据物理化学原理,任何体系的温度、压力及体系之间的性质是密切相关的,其中某个参数发生变化必会引起另外的参数发生变化。区域地球物理和地球化学资料显示出,岩石圈中的地温在不同构造单元是有很大差异的。例如:秦岭造山带地温梯度明显高于华北克拉通地温梯度,即便同为秦岭造山带中的地温梯度也是不同的。据秦岭造山带洛阳至秭归地学断面岩石学模型<sup>[11]</sup>,同在 30km 深处的华北克拉通为 300℃,华北克拉通南缘为 330℃,北秦岭造山带为 450℃,扬子克拉通北缘为 400℃。一个区域有其特有的地温曲线也应该有各自特有的压力梯度,但压力的组成和梯度的研究工作较少且零散。在地温和压力的组成相差都较大的不同构造单元,迄今人们不分构造活动期间和期后仍沿用 0.033GPa/km 地压梯度,而这一梯度只考虑了静岩载荷压力,而未充分考虑到岩石圈中特有的与中、下地幔和地核有明显区别的成分、相态、地温及体系性质等因素对岩石圈中压力的影响。

## 2 超高压变质作用的压力模型

超高压变质岩出露地区是岩石圈中极为特殊的地区,现有研究证实,在超高压变质岩形成与折返过程中存在过广泛的壳幔物质交换和化学反应,这一定会造成相变和体系性质的改变等等。因此,超高压变质岩出露地区是研究岩石圈压力组成与压力梯度的最理想的地区。

下面将在分析前人的压力计算公式和计算过程的基础上,结合超高压变质作用过程中广

泛存在的各种相变、化学反应等实际情况, 分析相态和物质成分、地温等因素对压力的贡献, 建立一个压力组成模式, 力图能充分反映超高压变质过程中各种因素对压力的影响。

## 2.1 水对压力的贡献

水是岩石圈中普遍存在的特殊组分。水在岩石圈中的含量从上到下依次减少。由于矿物脱结构水的温度很高(如滑石、绿帘石和云母的脱结构水的温度为  $800 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ <sup>[12, 13]</sup>), 所以在壳幔交换区微量水可存在于很深的部位。在地温低于水临界温度 ( $T < T_c$ ) 时, 由地表带入的水或矿物释出的结合水只能是液体, 换言之, 水的相态转变只能是固相和液相之间的转变(这里水的固态是指呈吸附状水或结合水); 在地温大于水临界温度 ( $T \geq T_c$ ) 时, 矿物中脱出的结合水只能是气体, 即在该温度区域, 水的相变只能是固相与气相之间的转变。一个体系中的组分和相态变化, 必然会引起包括压力在内的其它物理化学参数的变化。

在不同的地温梯度区域, 不同的含水矿物脱水后的体积增量是不同的, 相应产生的压力增量也是有差异的。如在不同的地温梯度区, 温度在  $500^{\circ}\text{C}$  以上的区域, 蛇纹石脱水反应后总体积增大  $7.78\% \sim 15.56\%$ ; 滑石脱水后总体积增大  $0.72\% \sim 4.12\%$ 。据地球初步参考模型 (PREM), 在  $24.4 \sim 220\text{km}$  范围内绝热体积模量变化于  $127.0 \sim 131.5\text{GPa}$  之间<sup>[14]</sup>; 若体积有  $1\%$  的增量就会引起  $1.27 \sim 1.315\text{GPa}$  的压力增量。由此可知, 蛇纹石和滑石等矿物脱水后的体积增量可引起较大的压力增量。

## 2.2 超高压变质作用的压力组成

要建立超高压变质作用的压力模型, 先要确定超高压变质作用压力的组成。我们将用类似数学中的微积分思维方法从俯冲块体中划分出一个小块体, 假定它是一个封闭体系, 那么该体系的压力组成包括:

(1) 上覆静岩载荷压力。在绝大多数地区它仍然是最主要的压力来源, 地压梯度为  $0.033\text{GPa/km}$  左右。可以把这种压力当作超高压变质作用的基础压力, 而把其它压力当作是该压力基础上的增压。

(2) 构造增压。构造增压可以理解为岩石圈中的实际力学状态偏离了静岩载荷压力计算时的平衡状态所产生的压力增量。构造增压不是普遍存在的, 不同区域相差较大。有资料表明<sup>[2]</sup>, 实际有效增压不超过  $0.4\text{GPa}$ <sup>[15]</sup> 和  $0.1\text{GPa}$ <sup>[16]</sup>, 极大值为  $0.8\text{GPa}$ <sup>[17]</sup>。近期关于构造超压在总压力中所占份额的争论, 其中心问题之一, 就是岩石和矿物保持弹性体状态到一定深度后会发生流变变形而转为塑性, 但人们在讨论超高压变质岩形成与折返时常做冷俯冲快速折返的假设——局部降低地温梯度, 无意中又增大了岩石或矿物保持弹性体状态的深度。由此看来, 构造超压存在什么深度的关键是岩石圈地温梯度及发生流变的起始深度。从现有资料看, 基性岩和超基性岩在贫水状态下在 Moho 面附近仍然保持弹性是没有问题的。

(3) 体系内部相变增压。这可以理解为岩石圈中实际相态组成偏离了静岩载荷压力计算时的绝热自压缩、成分均匀、相态(固体)不变的假设而产生的压力增量。在封闭体系中, 随着俯冲的进行, 体系温度不断增高, 封闭体系中发生一系列的化学反应和局部熔融等相态变化, 有气相和熔体相的参与, 这一切远远偏离了静岩载荷压力计算时的假设条件, 因此, 实际压力与静岩载荷压力一定会有很大的偏差。压力是与一定的化学成分、相态组成等相对应的, 若未发生相变时压力与相态的对应关系常易被忽略, 只有当发生相变时内部压力的变化差异才能显现出来。超高压变质岩形成过程中的相变增压现象或许不易见到, 但退变过程中的局部相变增压现象——柯石英退变成石英而在周围产生放射状裂纹则可见到。实验表

明, 温度在固体熔点处, 固体熔融后的体积增大 8%<sup>[18]</sup>, 同前述矿物脱水的增压计算一样, 固体局部压力增量可达 10.16~10.52GPa。由此可见, 体系内部的局部熔融和含水矿物脱水可以产生相当大的压力增量。只要这些压力增量中的一部分就可满足柯石英和金刚石等超高压矿物形成所需压力。

### 2.3 开放体系中构造变形、断裂、流变对压力的负贡献

岩石圈中压力会不断变化, 由于相变、构造超压等作用总压力会不断增加, 同样, 在开放体系中压力积累到一定程度后会释放而降低总压力。引起压力释放的因素, 包括地震, 岩石(层)发生变形破裂和爆炸, 相变及岩石由弹性向塑性转变而发生的流变等。超高压变质作用其实是高压释放中相变的一种类型, 因为超高压变质作用是一种矿物体积缩小的相变过程, 这一过程只有当这种岩石所处的环境没有发生压力释放的情况下, 或虽然发生压力释放但释放速率却大大小于压力积累速率时才能发生。

### 2.4 超高压变质作用的压力模型

在建立超高压变质作用压力模型时不考虑压力的释放, 并假定体系性质为封闭体系。基于上述分析, 静岩载荷压力、岩石圈实际力学状态偏离静岩载荷压力计算时力的平衡状态所产生的构造超压  $\Delta P_{\text{超}}$ , 岩石圈实际相态组成偏离静岩载荷压力 ( $P_{\text{静}}$ ) 计算时的成分均匀和相态不变等条件所产生的相变增压 ( $\Delta P_{\text{相}}$ ) 之和即为体系内总压力 ( $P_{\text{总}}$ ), 可表示如下:

$$P_{\text{总}} = P_{\text{静}} + \Delta P_{\text{超}} + \Delta P_{\text{相}}$$

$$P_{\text{总}} = P_{\text{静}} + \Delta P_{\text{超}} + (a\Delta P_{\text{气}} + b\Delta P_{\text{液}} + c\Delta P_{\text{固}})$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为体系中气相、液相、固相总摩尔数百分比,  $a + b + c = 1$ ;  $\Delta P_{\text{气}}$ 、 $\Delta P_{\text{液}}$ 、 $\Delta P_{\text{固}}$  分别为多相体系中气相、液相、固相压力减去静岩载荷压力后的压力增量

静岩载荷压力梯度可据第一节中的压力公式求得, 构造超压梯度计算可参见有关论述<sup>[4, 5, 13, 15, 16]</sup>。公式右边的第三项把超高压变质作用的压力与体系的性质、成分、相态、地温等联系在一起, 这正是以下要讨论的问题。

**2.4.1 气、液、固三态之间的相变对压力的影响** 若 3 个分别由气、液、固相组成的封闭体系被俯冲到岩石圈中同等深度且温度相等的地方, 由于气、液、固 3 相的状态方程不同, 这 3 个封闭体系的内部压力也会不同。3 个体系相对于前述静岩载荷压力计算时所假设的理想体系状态的压力增量也会不同, 而且彼此之间相差较大。假若一个固相体系处于前述静岩载荷压力计算时的理想体系状态时, 则体系总相变增压为零。因此, 在一个多相封闭体系中发生相变, 即  $a$ 、 $b$ 、 $c$  值发生变化, 则体系总相变增压也是变化的, 整个体系的总压力也将发生变化。

**2.4.2 固体相变对压力的影响** 岩石圈中固态占绝大部分。固体之间会发生相变, 如金刚石、柯石英的形成就是固体相变的典型例子。固体相变时同样会对压力产生影响, 但固体相变前后的各种状态下的参数变化不如固相向液相或气相相变过程中相应参数的变化大, 前者所产生的压力改变量可能会小于后者所产生的压力改变量。

**2.4.3 岩石圈的热结构对压力的影响** 由于岩石圈不是由前述静岩载荷压力计算时所假设的理想固体所组成, 不同的区域还可能有水和熔体等参与。水在岩石圈深部的温度大于水临界温度的区域必为气体, 由气体的状态方程可知, 温度增高时压力也会增高。同样, 温度升高, 固体和熔体的体积也会膨胀。这些体积增量都将转化为压力增量。因此, 若为封闭等容体系, 高地温梯度对形成高压和超高压是有利因素, 高地温度场可促使高压和超高压的形成; 若是在开放体系中, 只要释放压力的速率小于增压的速率时, 也可形成超高压环境<sup>[2]</sup>。

曾有学者注意到局部热异常会引起重力异常<sup>[19]</sup>。

在地球的较深部位构造超压已消失, 气相含量更少, 接近相态不变、成分均匀、绝热压缩的条件。超高压变质作用的压力模型公式中构造超压和相变增压趋近于零。此时的超高压变质作用的压力模型与原有的压力计算公式趋于一致。

### 3 结论

通过以上分析可知: 超高压变质岩形成过程中的环境远远偏离了全球压力计算时的化学组成均匀、相态不变(固态)、绝热、力平衡状态的假设条件, 存在着明显的相变和化学反应等, 也远非力平衡状态。因此, 超高压变质作用的压力不仅包括静岩载荷压力, 还应包括构造超压和体系内的相变增压。由于加入了新的压力增量, 增大了压力梯度, 改变了原有的压力计算公式中在岩石圈中压力与深度的近似线性关系使之变成非线性关系。

超高压变质作用中压力模型的提出(或岩石圈压力模型的修正)必然会触及包括超高压变质作用在内的一系列重大地学问题(地震、火山、超大型矿床和盆地分析等)的解释:

(1) 超高压变质岩形成深度的计算结果完全取决于压力模型的选择。原有的压力模型是在假设的理想前提下仅考虑静岩载荷压力而设计出来的线性模型, 所求出的压力为某一定值( $P$ )的相应深度, 是压力为该一定值( $P$ )的最大深度。若考虑体系内物质的相变增压及可能存在的构造超压, 则计算压力为某一定值( $P$ )的深度肯定要小于据以前压力模型所计算的深度。不可否认, 高压和超高压矿物形成时对高压力值的要求(虽然组分间相互影响可能会改变矿物相变线位置), 但可以重新计算其形成时的深度。

(2) 在地温高于水临界温度的深度时, 水相变增压作用极有可能成为地震、火山等地质作用的诱发因素。有许多资料显示出在上地幔深度存在水的活动, 不少学者也曾就此作过论述<sup>[1, 14, 20, 21]</sup>。常压下, 滑石、绿帘石、角闪石和云母脱结构水的温度在 800~1200℃ 之间, 高压下脱结构水的温度还会增高, 若俯冲块体中含有这些矿物时, 水完全有可能被带入到上地幔。在地温远高于水的临界温度(647.3K)的深度, 该处的水必定为超临界状态。若为封闭体系时, 由于水的相变而产生的增压效果很大, 极有可能成为地震、火山等地质作用的诱发因素。

### 参 考 文 献

- [1] 从柏林, 王清晨. 大别山—苏鲁超高压变质带研究的最新进展[J]. 科学通报, 1999, 44: 1127~1142.
- [2] 王方正. 高压超高压变质岩形成深度讨论[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1996, 21: 42~44.
- [3] 吕古贤, 陈晶, 李晓波, 等. 构造附加静水压力研究与含柯石英榴辉岩成岩深度计算[J]. 科学通报, 1998, 43: 2590~2602.
- [4] 王清晨, 刘景波, 从柏林. 构造超压能引起高压变质作用吗?[J]. 科学通报, 1999, 44: 2340~2350.
- [5] 吕古贤, 刘瑞. 成岩深度测算原理的探讨[J]. 科学通报, 1999, 44: 2350~2352.
- [6] D.L. 安德森. 地球的理论(关华平, 杨玉荣, 刘小伟等译)[M]. 北京: 地质出版社, 1993, 119~120, 176~180, 473~478.
- [7] 王家映. 地球物理学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. 10~14, 50~59.
- [8] 曾融生. 固体地球物理导论[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 236~245.
- [9] 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [10] Georgen D. Garland. 地球物理引论——地幔, 地核和地壳(陈, 唐晓明, 赵晓敏译)[M]. 北京: 地震出版社,

1987.435~439, 457~479.

- [ 11 ] 王方正, 路凤香, 孙平, 等. 秦岭洛阳-伊川-十堰-秭归地学断面大陆岩石圈的岩石学模型 [ J ]. 岩石学报, 1995, 11 ( 2 ): 227~241.
- [ 12 ] 陈国玺, 张月明. 矿物热分析粉晶分析相变图谱手册 [ M ]. 成都: 四川科技出版社, 1989.
- [ 13 ] 黄伯龄. 矿物差热分析鉴定手册 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [ 14 ] Anderson T, O' Reilly S Y and Griffin W L. The trapped fluid phase in upper mantle xenoliths from Victoria, Australia: implications for mantle metasomatism [ J ]. Contrib. Mineral Petrol, 1984, 88: 72~85.
- [ 15 ] Brace W F, Ernst W G, Kallberg R W. An experimental study of tectonic overpressure in Franciscan rocks [ J ]. Geol Soc Am Bull, 1970, 81: 1325~1338.
- [ 16 ] Clark S P. A redetermination of equilibrium relations between kyanite and sillmanite [ J ]. Am J Sci., 1961, 259: 641~650.
- [ 17 ] Mancktelow N. On metamorphic " pressure " during deformation [ J ]. Schweiz Mineral petrogr Mitt, 1993, 73: 340~341.
- [ 18 ] 陈 丰, 林传易, 张惠芬. 矿物物理学概论 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1995.362.
- [ 19 ] 杨学祥, 杨文瑛. 局部热膨胀产生的重力异常及构造意义 [ J ]. 地壳形变与地震, 1995, ( 1 ): 1~6.
- [ 20 ] 游振东. 变质地质学的三大前缘 [ J ]. 地学前缘, 1994, 1 ( 1~2 ): 111~124.
- [ 21 ] 陈 丰, 郭九皋, 王三学, 等. 金刚石中的高钾高氯包体和地幔交代作用 [ J ]. 矿物学报, 1992, 12: 193~199.

## A PRESSURE MODEL FOR ULTRAHIGH-PRESSURE METAMORPHISM

HU Bao-qun, WANG Fang-zheng, XIAO Long

( Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China )

**Abstract** : Based on the study on the ultrahigh-pressure metamorphism and the calculation of pressure pervading in the crust, the present paper shows that the pressure causing ultrahigh-pressure metamorphism should include in addition to the load of surrounding rocks also the pressure arising from phase change, and tectonism. A model for ultrahigh-pressure metamorphism to is thus proposed. In this model the pressure-depth relation is not linear.

**Key words** : ultrahigh-pressure metamorphism ; phase change ; tectonism