

# 构造超压能引起超高压变质作用吗？

王清晨 刘景波 从柏林

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 针对“超高压变质岩在约 32 km 深处受构造挤压作用而形成”的认识,列举岩石学和构造地质学论据,指出差应力引起的构造超压受到岩石强度的限制,由于岩石本身力学性质、应变速率及温度的影响,构造超压不会超过 1 GPa,更不会引起超高压变质作用. 在计算塑性体变形或弹塑性体的塑性变形阶段的主应力值时,不应运用应力-应变的弹性本构方程.

**关键词** 超高压变质作用 构造超压 塑性变形

超高压变质作用研究在国际上已经开展了 15 年. 继柯石英在西阿尔卑斯被发现之后,80 年代末至 90 年代初世界各地(包括中国大别山-苏鲁碰撞造山带在内)许多地点发现了含柯石英的超高压变质岩,其形成时代遍及显生宙各个时期. 岩石学研究表明,超高压变质岩的形成压力 > 2.8 GPa(相当于 27 000 多个大气压). 岩石学家们认为,这一压力主要来自静岩压力的贡献,并认为超高压变质岩形成于 90 km 的地幔深处. 正是这一原因使超高压变质岩成为透视地球深部地质过程的一个新窗口,给国际固体地球科学界带来新思维,控制超高压变质岩形成与折返的地球动力学过程正日益显出在大陆岩石圈形成演化中的重要性.

然而,近几年国内一些学者不断对超高压变质岩的形成深度提出异议. 例如,文献[1]认为,超高压变质岩可由壳内构造挤压作用引起的构造超压形成,并估算大别山柯石英榴辉岩的形成深度稍 > 32. 106 km. 这与多数学者估算的 90 km 相去甚远. 本文针对文献[1]的论点,

- 3 陈文寄,李大明. K-Ar 和  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法. 见:陈文寄,彭贵主编. 年轻地质体系的年龄测定(第三章). 北京:地震出版社,1991. 77~81
- 4 陈文寄,李大明,戴耀谦,等. 大同第四纪玄武岩的 K-Ar 年龄及过剩氩. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京:地震出版社,1992. 81~92
- 5 刘若新,陈文寄,孙建中,等. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京:地震出版社,1992. 1~43
- 6 葛同明,陈文寄. 雷琼地区第四纪地磁极性年表——火山岩 K-Ar 年龄及古地磁学证据. 地球物理学报,1989,32(5): 550~558
- 7 陈文寄,葛同明,李大明,等. 雷琼地区新生代玄武岩的 K-Ar 磁性地层年代表. 见:刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京:地震出版社,1992. 239~245
- 8 穆治国,刘玉林,黄宝玲. 细粒橄榄石对中国晚新生代橄榄玄武岩 K-Ar 定年的影响. 科学通报,1998,43(7): 764~766
- 9 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. 岩石学报,1987,10(2): 21~31
- 10 穆治国,佟伟,Gariss H C. 腾冲火山活动的时代和岩浆来源问题. 地球物理学报,1987,30(3): 261~270
- 11 佟伟,章铭陶. 腾冲地热-青藏高原横断山区科学考察丛书. 北京:科学出版社,1989
- 12 范嗣昆,朱炳泉,王慧芬. 云南腾冲火山群的 K-Ar 年代学研究. 见:火山作用与人类环境,北京:地震出版社,1995. 89~90
- 13 胡世玲,王松山,刘嘉麒,等. 五大连池新生代玄武岩的 K-Ar 年龄和锶钕同位素特征. 岩石学研究,1983(2): 22~29

(1999-02-22 收稿,1999-05-27 收修改稿)

着重讨论构造超压能否引起超高压变质作用. 我们认为, 这种讨论对于深刻认识低密度大陆壳物质的深俯冲作用是十分必要的.

## 1 超高压变质岩形成深度的岩石学论据

在由沉积岩和火成岩转变为超高压变质岩及其后发生的退变质过程中, 会发生一系列矿物相转变, 如钠长石 + 硬玉 + 石英, 钙长石 + 钙铝榴石 + 蓝晶石 + 石英, 钠云母 + 蓝晶石 + 硬玉 + 水, 石英

柯石英, 及石墨 + 金刚石等(图1). 所有这些反应的平衡压力-温度都已经过实验标定, 如钠长石

硬玉 + 石英在 600 ~ 800 °C 下为 1.4 ~ 1.8 GPa, 石英 + 柯石英在 600 ~ 800 °C 下为 2.6 ~ 2.8 GPa, 石墨

+ 金刚石在 600 ~ 800 °C 下为 3.3 ~ 3.6 GPa. 这里需要指出两点: ( ) 这里所标定的压力为在实验条件下的“围压”, 与构造地质学中所用的“静岩压力

(lithostatic pressure)”相当, 表示由岩石的重量所产生的压力, 它随深度增大而增大; ( ) 上述实验岩石学数据中的压力仅指示了参加反应的各矿物相达到平衡时的压力, 当只有高压相矿物存在时, 其稳定域的压力将大于该值.

在大别山-苏鲁超高压变质岩带中, 已经发现了经历上述反应的前进变质和退变质过程不同阶段的矿物组合. 其中柯石英榴辉岩相的变质年龄

为 219 ~ 238 Ma, 角闪岩相退变质年龄为 174 ~ 181 Ma. 另一方面, 超高压-高压变质岩在区域上占据着特定的空间位置, 由北向南为柯石英榴辉岩带-石英榴辉岩带-蓝片岩带, 每一相带的宽度为几公里至几十公里, 长度均超过 200 km<sup>[2]</sup>. 这表明, 大别山-苏鲁地区的超高压变质作用是区域性的, 在时间上也占有特定的时段, 而并非局部性瞬时效应.

最近 Dobrzhinetskaya 等人<sup>[3]</sup>在超高压变质的 Alpe Arami 橄榄岩中, 发现了橄榄石中有许多微米级的 FeTiO<sub>3</sub> 出溶体, 其中含较高的 TiO<sub>2</sub> (约 0.7 %), 是橄榄石在 10 ~ 15 GPa 的压力下 (相当于 300 ~ 400 km 深度) 作为钙钛矿出溶生成的. 大别山-苏鲁地区橄榄岩的橄榄石中也发现了细针状富铬钛铁矿成分相和含钛铬磁铁矿的针状出溶体, 暗示这些橄榄石或其中的部分成分可能曾被转变为尖晶石相结构<sup>[4]</sup>. 同时还发现, 束状单斜辉石常作为石榴子石的环边产出. 到目前为止, 这种结构仅见于超深的 (> 300 km) 地幔岩包体中<sup>[5,6]</sup>.

上述岩石学资料表明, 大别山-苏鲁超高压变质岩是区域性变质作用的产物, 形成压力为 2.8 ~ 15 GPa, 当这一压力值均为静岩压力的贡献时, 相当于 90 ~ 400 km 深度.

## 2 构造超压不会引起超高压变质作用的构造地质学论据

物体受力时, 应力分解为两部分: 一是引起体形变的平均应力 (因其各向相等而称球应力), 二是引起物体剪应变的剪应力 (因其各向不等而称差应力). 文献[1]所说的构造附加静

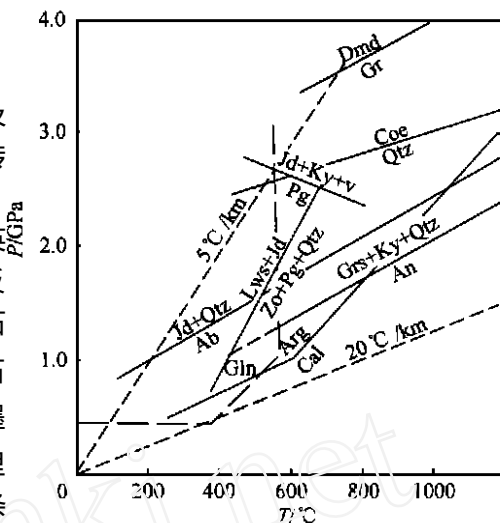


图1 与超高压变质作用有关的岩石成因格子反应曲线所代表的反应式及矿物缩写为: 钠长石 (Ab) + 硬玉 (Jd) + 石英 (Qtz), 钙长石 (An) + 钙铝榴石 (Grs) + 蓝晶石 (Ky) + 石英 (Qtz), 钠云母 (Pg) + 蓝晶石 (Ky) + 硬玉 (Jd) + 水 (v), 硬柱石 (Law) + 硬玉 (Jd) + 黝帘石 (Zn) + 钠云母 (Pg) + 石英 (Qtz), 方解石 (Cal) + 文石 (Arg), 石英 (Qtz) + 柯石英 (Coe), 石墨 (Gr) + 金刚石 (Dmd), 长虚线代表蓝闪石 (Gln) 稳定域, 短虚线为地温梯度

水应力指的就是构造力对平均应力的贡献。从物理化学角度看,平均应力引起相变,即变质反应;剪应力造成晶体内位错,从而加速相变过程。显然,引起超高压变质作用的压力来自平均应力( $P_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ )。需要进一步指出的是,静岩压力是一种静水型应力,以各向同性和随深度增大而增大为特征。Clark<sup>[7]</sup>提出,在地下某深度,差应力(differential stress)的存在会使该处的平均应力超过静岩压力,并首创构造超压(tectonic overpressure)一词称谓这一超出部分。

榴辉岩相变形的存在表明,差应力在超高压岩石形成过程中是客观存在的。在此意义上讲,文献[1]的研究是有意义的。但必须指出,构造超压是由差应力引起的,并由岩石来承受和传递的,必然受到岩石强度的限制,一旦应力超过强度极限,岩石就会发生破裂或流变,差应力便随之释放,构造超压也不再存在。岩石本身的力学性质、应变速率、及温度都会影响岩石的强度。

大别山-苏鲁超高压变质岩的岩性复杂,强干(competent)岩石(榴辉岩和橄榄岩)只占40%,而其余60%均为软弱(incompetent)岩石(片岩、片麻岩和大理岩)。研究表明,此类软弱岩石的单轴抗压强度为0.03~0.15 GPa<sup>[8]</sup>。对超高压变质岩的野外观测表明,这些软硬程度不同的各类岩石在野外混杂产出,作为整体,它们很难承受较大的差压力及由之引起的构造超压。

实验表明,应变速率的降低和温度的增高对应变有等效作用,均会降低岩石的塑性强度。在温度超过600℃时,包括大理岩、石英岩、辉绿岩在内的大多数岩石的塑性强度(plastic strength)均低于0.05 GPa<sup>[9]</sup>。因此,在中下地壳至上地幔深度,大陆壳岩石在发生塑性变形前所能承受的差应力在数量级上不会超过 $10^{-1}$  GPa,而这也正是构造超压的值域上限。

Clark本人<sup>[7]</sup>也认为,构造超压的幅度为0.1 GPa;对加利福尼亚蓝片岩的实验研究表明,构造超压小于0.4 GPa<sup>[10]</sup>;而迄今对构造超压的最高估算为0.8 GPa<sup>[11]</sup>。以此最大值计,形成超高压变质岩的静岩压力仍然有2~14 GPa,相当于60~350 km。而0.8 GPa的压力远小于石英-柯石英和石墨-金刚石的相变线,不会形成柯石英等超高压矿物,不足以导致超高压变质作用。

### 3 超高压变质岩形成深度估算的理论基础问题

毫无疑问,地下某处的应力状态是由该处上覆岩石的总重力(即静岩压力)和构造应力作用共同引起的。文献[1]提出,构造应力也会产生一部分“构造附加静水压力”(相当于构造超压),而对这一“构造附加静水压力”的测算即为该文的核心。但在该文的测算中,有3个问题需要讨论。

(1) 石榴石变形参数的计算。文献[1]对差应力的计算基于对石榴石位错的测量,并在含主变形轴的两个相互垂直的ac面和bc面上对石榴石的变形轴比进行了测量。应注意:石榴石为等轴晶系矿物,所测样品中的形组构是塑性变形的结果。我们根据该文中提供的石榴石变形轴比,计算了富林(Flinn)参数 $K$ 。样品Y1和Y2的 $K$ 值分别为0.22和0.10(表1),表明它们的应变椭球为三轴扁椭球( $a = b > c$ ),属压扁型应变,主应力值的相对大小为 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 。然而,文献[1]估算出的变形主应力值的相对大小却为 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 。显然,该文的计算出现了错误。

表 1 变形石榴石的应变状态

样品号	$a_1 (= b/c)^{a)}$	$a_2 (= a/b)^{a)}$	$a_3 (= a/c)^{a)}$	$K$
Y1	1.58	1.13	1.78	0.22
Y2	1.60	1.06	1.69	0.10

a)  $a, b, c$  为变形轴 ( $a > b > c$ ),  $a_1, a_2, a_3$  为变形轴比,  $K$  为富林参数

(2)石榴石位错与差应力估算. 首先,文献[1]误解了在  $ac$  面和  $bc$  面上测算出的差应力值的真实含意. 石榴石中的自由位错是由差应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )引起的. 考虑到前述石榴石的应变椭球为三轴扁椭球( $a > b > c$ ),无论在平行  $\sigma_1$  的哪一个切面上测量,所得到的差应力值都应相同. 因此,在  $ac$  面和  $bc$  面上测算出的差应力值  $A$  与  $B$  间的差别只是测量误差引起的. 但文献[1]却认为它们分别代表( $\sigma_1 - \sigma_3$ )和( $\sigma_2 - \sigma_3$ )的值,并作为方程式  $\sigma_1 - \sigma_3 = A$  和  $\sigma_2 - \sigma_3 = B$  的计算依据. 结果,算出的  $\sigma_1$  竟然  $< \sigma_2$ ,这是错误的输入导致了错误的输出.

其次,通过位错密度来估算差应力的古应力计本身尚不完善,其中实验常数  $K$  值的测定仍是难题,对材料系数  $\nu$  的修正也是基于对有限样品的观测做出的. 而且文献[1]中对石榴石测量的样品太少,其代表性和估算值的精度都值得考虑. 若仅依据这一极为有限的观测和计算去论证超高压变质岩的形成深度为 32.106 km,从而推翻目前国际超高压变质作用研究界的主流结论,未免有些草率.

(3)文献[1]的另一根本性错误是应用弹性本构方程去计算塑性变形中应力-应变关系. 固体材料的总应变( $\epsilon$ )可分为弹性部分( $\epsilon_e$ )和塑性部分( $\epsilon_p$ ),即  $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$ . 文中假定  $\epsilon_1 / \epsilon_3 = \epsilon_{p1} / \epsilon_{p3}$  ( $\epsilon_1$  和  $\epsilon_3$  为总应变的分量,  $\epsilon_{p1}$  和  $\epsilon_{p3}$  为塑性应变的分量),这实际上是设弹性应变( $\epsilon_e$ )为零,把石榴石作为理想的塑性体. 塑性体在应力超过屈服极限时会持续变形,即使取消应力,应变值也会保持不变. 显然,塑性变形的应力-应变间既没有线性关系,也没有一一对应关系,当然不应使用弹性本构方程去求解. 即使是把石榴石作为一种弹塑性体对待,其变形已进入塑性变形阶段,应力-应变间同样不是直线关系,不能再用小变形弹性关系去描述. 文献[1]一方面把石榴石假设为塑性体,另一方面又把石榴石的塑性变形轴比  $a_3$  代入仅适用于弹性变形的方程式(其中  $\nu$  为泊松比):

$$\frac{1 - \nu(\epsilon_2 + \epsilon_3)}{3 - \nu(\epsilon_1 + \epsilon_2)} = a_3,$$

这样的计算必然要出错.

4 结论

上述讨论表明,差应力引起的构造超压严格受到岩石强度的限制,由于岩石本身力学性质、应变速率及温度的影响,它们在变形前所能承受的差应力不会超过 1 GPa. 这一数值代表了构造超压的值域的上限. 同时,这一差应力仅引起岩石的变形,不会引起超高压变质作用. 另外,文献[1]既然已经把石榴石作为理想的塑性体,并假设石榴石的弹性应变( $\epsilon_e$ )为零,那么,就不应该运用弹性本构方程去计算石榴石塑性变形中的应力-应变关系. 所以,文献[1]由此得到的关于“超高压变质岩形成于约 32 km 深处”的结论是不正确的.

我们的结论是,由差应力引起的构造超压不会造成超高压变质作用,超高压变质岩依然是

## 透视地球深部动力学过程的重要窗口.

致谢 审稿人对本文的初稿提出了宝贵修改意见,使讨论更有针对性.在此谨向他们表示衷心感谢.本工作为国家自然科学基金(批准号:49772150)和中国科学院重大项目(KZ951-A1-401)资助项目.

## 参 考 文 献

- 1 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测算.科学通报,1998,43(24):2590~2602
- 2 Wang Q, Cong B. Supracrustal sleeve experienced ultrahigh-pressure metamorphism. Continental Dynamics, 1998, 12: 54~62
- 3 Dobrzinskaya L, Green H W, Wang S. Alpe Arami: a peridotite massif from depths more than 300 km. Science, 1996, 272: 1841~1845
- 4 Jin Z, Jin S, Gao S, et al. Is the depth where UHP rocks were formed in the Dabie Mountains limited to 100~150 km? Chinese Science Bulletin, 1998, 43(7): 767~771
- 5 Haggerty S E, Sauter V. Ultra-deep (>300 km) ultramafic upper mantle xenoliths. Science, 1990, 248: 993~996
- 6 Sauter V, Haggerty S E, Field S. Ultra-deep (>300 km) ultramafic xenolith: new petrologic evidence from the transition zone. Science, 1991, 252: 827~830
- 7 Clark S P. A redetermination of equilibrium relations between kyanite and sillimanite. Am J Sci, 1961, 259: 641~650
- 8 Touloukian Y S, Judd W R, Roy R F. Physical properties of rocks and minerals. New York: McGraw-Hill Book Company, 1981. 400
- 9 Carter N L, Tseen M C. Flow properties of continental lithosphere. Tectonophysics, 1987, 136: 27~63
- 10 Brace W F, Ernst, W G, Kallberg R W. An experimental study of tectonic overpressure in Franciscan rocks. Geol Soc Am Bull, 1970, 81: 1325~1338
- 11 Mancktelow N. On metamorphic "pressure" during deformation, Schweiz. Mineral Petrogr Mitt, 1993, 73: 340~341

(1999-04-24 收稿,1999-07-10 收修改稿)

# 成岩深度测算原理的探讨

吕古贤 刘瑞

(中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081; 北京大学地质系,北京 100871)

**摘要** 现有资料已经证明,岩石圈及其以下相当深度的岩石表现为固体性质,因此,应该按固体内应力状态测算深度;岩石力学实验证明围压越大,岩石的抗张、抗剪强度越高,在持续增高围压的条件下,岩石抗压强度几乎是无限的,Sibson 提出 10~15 km 左右之下岩石逐渐由脆性转变为韧性.韧性岩石仍是具有弹性的固体,并不处于静流体压力状态.在目前缺乏反映流变程度数据的情况下,当已经测得不可忽略的差应力时,暂用弹性固体模型代替静止流体模型可以求算较准确的深度.由弹性模型进一步发展为粘弹性模型将是一种进步,而如果从弹性模型又回到静流体模型则不能认为是一种前进.构造应力场中大于差应力一个数量级的各向等正应力叠加在重力附加静压力之上,能够引起超高压变质作用.

**关键词** 成岩深度 固体应力状态 构造附加静水压力 岩石强度

成岩深度测算的理论依据应该是对地下处于什么样的应力状态的正确认识.迄今一些学