

文章编号: 1006-6616 (2000) 03-0045-05

# 地质作用深度测算中的问题

刘瑞<sup>1</sup>, 吕古贤<sup>2</sup>

(1. 北京大学地质系, 北京 100871; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 迄今为止, 地质作用的深度通常是用压力除以密度来计算的。这种方法只在假设岩石处于静止的液体状态下才是正确的。然而, 实际上从浅部地壳直至地幔深处的岩石都是固体状态而不是液体状态, 且粘性系数随深度递增。实测数据表明, 地下水平压应力总是大于垂直压应力, 说明构造力在量值上超过重力。所以, 在地壳中进行地质作用深度的测算必须把岩石看作是固体并依据固体物理理论。因此, 吕古贤等在文献 [16] 中提出的深度测算方法 (1998) 是有意义的。

**关键词:** 地质作用深度; 应力状态

中图分类号: P588.33

文献标识码: A

地质作用深度测算的准确与否涉及地质研究结论的准确与否。目前, 除用地球物理测深方法外, 多数地质学家主要用测得的压力除以岩石的密度计算上覆岩石的深度。这种方法源于瑞士地质学家海姆 (Heim, 1878)<sup>[1]</sup>提出的假设: 地下岩石处于静水压力状态。按照这个假设, 某一深处的岩石各方向压力相等, 而且都等于该处至地表岩石柱的总质量。换句话说, 地下的压力只来自重力, 且随深度的增加呈直线增加。按照这个假设, 地下不应该存在应力差, 也没有剪应力。如果存在应力差, 就破坏了静水压力假设, 因为静水中任何深度都没有应力差, 这是帕斯卡原理所决定的。只有在静止流体 (水) 中, “压力/密度”方法测深才是准确的。

岩石不是液体, 虽然在极缓慢的条件下具有流变性, 却不能消除岩石内部的应力差, 在外力作用下存在着受力截面与侧截面之间的应力差。对于地下某一深处某一岩石单元体来说, 不仅构造力是外力, 上覆岩石的重力也是外力。前者多半是水平力, 后者主要是垂直力。针对岩石的固体性质, 前苏联学者金尼克 (Динник, 1937)<sup>[2]</sup>对地下的应力状态提出新的认识: 即地下某一深处的垂直应力等于上覆岩石柱的总质量, 而侧向压力不等于垂向压力, 侧向压力的量值可依据泊松比系数求算。依据这个原理, 要计算深度就应该测出作用在某一深处水平截面上的垂向压力再除以岩石的密度来算得。同理, 地下处处都应该是垂向压力大于侧向 (水平方向) 压力, 因为岩石的泊松比系数通常为 0.2~0.25。依据这种认识, 要测出深度必须定向地测出垂向压力, 在地应力测量方法出现以前, 由于不能定向地测地应力, 所以无法估算深度。

从 1932 年美国在胡佛水坝的隧道中成功地进行了世界上第一例地应力测量开始, 陆续

收稿日期: 2000-06-10

基金项目: 国家自然科学基金 (49672152), (49972080)

作者简介: 刘瑞 (1938-), 男, 教授, 博导, 从事构造地质、显微构造、应用构造地质研究和教学。

出现各种地应力测量方法和一批地应力数据。这些方法中以瑞典乌鲁萨拉地震研究所的哈斯特地应力解除法最为完善<sup>[3]</sup>。截止 60 年代后期,全世界所积累的上万个地应力测量数据表明,绝大多数地应力值是以压应力为主,而且水平应力大于垂直应力<sup>[4]</sup>。针对这些事实,李四光最先提出水平应力主导性的概念<sup>[5]</sup>。与此同时,我国的地应力测量工作也迅速开展起来<sup>[6-8]</sup>。这些测量也表明最大压应力是水平或接近水平的,而垂直应力常常是最小的<sup>[8]</sup>。图 1 标出主应力值随深度变化的关系。图中用水压致裂法测得的铅直应力最靠近铅直应力的理论值,这个理论值基本上是按照深度和密度的乘积来计算的。可以看出,最大水平应力往往比垂直应力大很多。

这些测量结果不仅证实地下岩石的应力状态不是如同静止液体的静水压力状态,而且还证实水平方向的构造力不仅弥补了重力引起的侧向力(两个互相正交的水平方向),而且超出了铅直方向的重力载荷力。在这种应力状态下,如果用“压力/密度”法计算深度就会偏大很多,是不正确的。例如,我们在图 1 中 20m 深处的 A 点测到压应力值约为  $18\text{kg/cm}^2$ ,

从图上可以读出这一深处的两个水平方向的压应力均是  $22\text{kg/cm}^2$ ,而这一点的均衡压力就等于垂向应力值,即  $18\text{kg/cm}^2$ 。现在用“压力/密度”法求算深度。设岩石相对密度比为 2.9,则深度为 62m,而实际上是在 20m 深处测到的;亦可以从图 1 上过 A 点作平行纵坐标的直线,该线向上交横坐标轴的  $18\text{kg/cm}^2$  处,向下与铅直应力理论直线相交,该处深度是 62m。可见用“压力/密度”法测算的深度误差是原深度的 3 倍多。所以,“压力/密度”法在固体物质中实施深度测算是极不妥当的,它可能将本来发生于浅部的地质作用错误地夸大 1 倍、2 倍,甚至 3 倍的深度。这种错误可能给许多地质问题的解释引出错误的结论。例如,研究压力、温度、时间演化的  $PTt$  轨迹时,当  $P$  增加时,一般都解释为深度加大,但同时也会因为有构造力的增加而深度却没有加大的可能。再例如,当测到压力高达几个 GPa 量值时,就立即推测是超高压,深度达 100km,达上地幔的深度,而实际上,它可能只是发生在地壳内的事。

有事实表明,只有几千米深的油井下可以测到高达 GPa 量值的压力,可造成高压井喷,而它只是在地壳的浅部。由于我们至今仍然沿用 100 多年前海姆用静水压力求深度的计算方法测算地质作用的深度,使我们在估算地质作用深度上可能出现许多错误,还可能依据这种错误估算的深度提出各种模型,当然,这些模型也是错误的。

近 30 年来,利用变形矿物的显微构造,如自由位错密度、动态重结晶粒度和亚晶粒等估算古差应力的方法(又称古应力计方法)已逐步形成并完善<sup>[9-11]</sup>,利用这个方法在全球

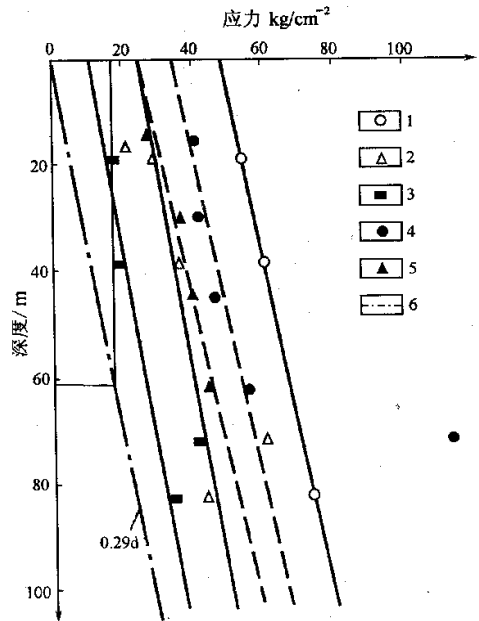


图 1 主应力值随深度的变化

Fig.1 Principal changes with depth

1-3. 用水压致裂法测得的最大水平主应力、最小水平主应力、铅直应力; 4、5. 用应力解除法测得的最大水平主应力、最小水平主应力; 6. 铅直应力的理论值  
(据文献[8]修改)

许多地方的不同深度都测到了量值不可忽视的应力差(差异应力)。我国学者也做了大量的工作,其中包括来自地幔的橄榄石的应力差测定。这些测算证实华北多处出露的地幔来源的橄榄岩包体中的应力差为  $10\text{MPa} \sim 40\text{MPa}$ <sup>[12]</sup>,而实验测试橄榄岩的流动应力(相当应力差)量值比从显微构造计算的量值还要高一个数量级<sup>[13]</sup>。从地下浅处到上地幔都存在应力差,这说明在这个范围内的岩石是固体而不是液体,因而不适用“压力/密度”法作深度测算。吕古贤提出用“构造附加静水压力”进行深度校正方法的原理是<sup>[14,15]</sup>,从总压力中减去构造力附加的均压部分剩下仅由重力造成的均压,再除以岩石的相对密度,用这种方法测试超高压(含柯石英)榴辉岩的形成深度只有  $32\text{km}$  左右<sup>[16]</sup>。王方正提出除了重力负荷和构造力外,由于相变引起体积变化而产生的压力在固体中尤其明显,体积增量只有  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  的封闭体系中,可以造成  $10^2\text{MPa}$  的压力增量,因而比这稍大的体积增量足以满足柯石英和金刚石形成所需的压力<sup>[17]</sup>。由此可见,在固体中引起压力增加的除了深度(重力载荷)之外还有多种因素,仅仅简单地用“压力/密度”法测算会明显夸大实际地质作用的深度。

在深度测算中还有几个需要澄清的概念。有一种看法,认为构造力是定向力引起应力,而应力专指剪应力;重力则引起均衡压力(静水压力),所以对构造力如何转化成均衡压力存在疑问。其实,构造力和重力都是矢量(在物理概念中没有定向压力的定义),对于地下某处岩石来说,无论水平的构造力还是垂直的上覆岩石重力都是外力。这两种外力分别在岩石内的不同截面上都可以产生各自的内力,单位面积上的内力称为应力,垂直截面的应力称正应力,分为压应力和拉应力,平行截面的应力称为剪应力。在同一截面上两个外力引起的正应力和剪应力可以分别叠加(不是转化或转换)。在原应力基础上的叠加,也可称为附加<sup>[14]</sup>。Clark (1961)<sup>[18]</sup>提出的“tectonic overpressure”被译为中文是“构造超高压”或“构造超压”,实际上该词也是构造附加压力的涵义,并没有“超高”的意思,与“超高压变质作用”中的“ultra-high pressure metamorphism”中的“超高压”含意不同。Clark 在 30 年前就认为蓝晶石形成的压力由重力推算仅需  $30\text{km}$  深度,如果考虑构造附加压力(tectonic overpressure)则不需要这么深。另外,应力差(差异应力)本身不是剪应力,应力差通常是指两个(或三个)主截面(主应力作用的截面)上的正应力之差,主截面上没有剪应力。有应力差时,与主截面相交呈各个角度的斜截面上都有剪应力,其中以  $45^\circ$  相交的斜截面上剪应力最大,量值为应力差的一半。静止液体中没有应力差,所以液体内任何截面上都没有剪应力。液体中的应力状态也称静水压力状态,因此,液体中不能传递剪切波(横波)。固体中通常存在应力差,因而斜截面上存在剪应力,所以,固体可以传递剪切波。从地壳浅层到  $2900\text{km}$  深处都可以传递剪切波,这个范围内的物质基本上具固体性质。用粘性系数可以表示物质的液态和固态的程度,地表花岗岩粘性系数约  $1 \times 10^{19}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,岩盐和泥质页岩较软,分别为  $3 \times 10^{16}\text{Pa}\cdot\text{s}$  和  $8.5 \times 10^{16}\text{Pa}\cdot\text{s}$ <sup>[19]</sup>,而上地幔岩石的粘性系数均为  $10^{20} \sim 10^{22}\text{Pa}\cdot\text{s}$ <sup>[12]</sup>,比地表固性最强的岩石具有更强的固性,更不容易流动。从粘性系数也可以看出,地下岩石,包括地幔物质,在整体上比地表岩石更具固性;而水的粘性系数只有  $10^0\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,因此,用液体法则求算地下岩石的压力或深度是极不合理的。探讨地下压力和深度的关系,以及影响压力的地质因素问题,不是静态流体问题而是更具固体状态的力学问题,因而有其复杂性。吕古贤等提出的初步算法<sup>[14~16]</sup>,是依照固体物理理论提出的,是值得探讨的。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Heim A. Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung [ M ]. Bd. II. 1878.
- [ 2 ] Динник А Н. О работах связанных с проблемой управления кровлей [ A ] ... В сб. Труды Конисии по управлению кровлей и доклады на I. Вседонецком совещ. по управлению кровлей [ M ]. Харьков-Киев. ОНТИУССР, 1937.
- [ 3 ] Hast H. The measurement of rock pressure in mines [ M ]. Sveriges Geol. Undersokning Ser. C. Arsbok, Stockholm, 1958.
- [ 4 ] Hast H. The state of stress in the upper part of the Earths Crust [ J ]. Tectonophysics, 1969, 8 : 169211.
- [ 5 ] 李四光. 地壳构造与地壳运动 [ J ]. 中国科学, 1973, 4 : 400~429.
- [ 6 ] 李方全, 王连捷. 华北地区地应力测量 [ J ], 地球物理学报, 1979, 22 ( 1 ): 1~8.
- [ 7 ] 王连捷, 李方全, 廖椿庭, 等. 绝对地应力测量的实验研究 [ A ], 地震局地震地质大队情报室编. 地应力测量原理与应用 [ C ]. 北京: 地质出版社, 1981. 113~125.
- [ 8 ] 李方全, 李延美, 王恩福, 等. 水压致裂法原地应力测量试验 [ A ]. 地震局地震地质大队情报室编. 地应力研究文集 [ C ]. 北京: 地震出版社, 1984. 15~19.
- [ 9 ] Twiss R J. Theory and applicability of a recrystallized grain size paleopiezometer [ J ]. Pure Appl. Geophys., 1977, 115 : 227244.
- [ 10 ] Mercier J C, Anderson D A, Carter N L. Stress in the lithosphere : Inferences from steady state flow of rocks [ J ]. Pure Appl. Geophys. 1977, 115 : 199226.
- [ 11 ] Weathers M S, Bird J M, Cooper R F, Kohlstedt P L. Differential stress determined from deformation-induced microstructures of the Moine thrust [ J ]. J. Geophys. Res., 1979, 84, B : 74957509.
- [ 12 ] 林传勇, 史兰斌, 何永年. 华北地区上地幔流变学特征初探 [ A ]. 刘若新主编. 中国上地幔特征与动力学论文集 [ C ]. 北京: 地震出版社, 1990. 93~101.
- [ 13 ] 金振民, Borch R S, Green II H W. 尖晶石二辉橄榄岩高温高压变形实验及其上地幔动力学的意义 [ A ]. 刘若新主编. 中国上地幔特征与动力学论文集 [ C ]. 北京: 地震出版社, 1990. 102~111.
- [ 14 ] 吕古贤. 关于构造作用力影响静水压力问题 [ J ]. 科学通报, 1995, 40 ( 3 ): 286.
- [ 15 ] 吕古贤, 刘瑞. 重力和构造力在地壳中的作用 [ J ]. 高校地质学报, 1996, 2 ( 1 ): 28~37.
- [ 16 ] 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 [ J ]. 科学通报, 1998, 43 ( 24 ): 2590~2602.
- [ 17 ] 王方正. 高压、超高压变质岩形成深度讨论 [ J ]. 地球科学, 1996, 21 ( 1 ): 41~44.
- [ 18 ] Clark J R. A Redetermination of equilibrium relations between kyanite and sillimanite [ J ]. Am. J. Sci. 1961, 259 : 641650.
- [ 19 ] 格佐夫斯基 М В. 构造物理学基础 [ M ]. 北京: 地震出版社, 1984. 34~36.

## CONSIDERATIONS ON DETERMINATION OF THE DEPTH OF GEOLOGICAL PROCESSES

LIU Rui-xun<sup>1</sup> , LU Gu-xian<sup>2</sup>

(1. *Department of Geology , Peking University , Beijing 100871 , China ;*

2. *Institute of Geomechanics , CAGS , Beijing 100081 , China )*

**Abstract :** The method sofar adopted to determine the depth where geological processes occur is to divide the pressure by specific weight ( density ) of rocks. This method is correct only when the rocks are assumed to be hydrosatic. Actually , rocks from the shallow crust to the deep mantle , are not ideally hydrosatic , and the viscosity coefficient of them is known to increase gradually with depth. Also , stress measurements show that horizontal compressive stress is usually greater than vertical stress at some depth , indicating the important role of tectonic force in the stress state of rocks. It is worthy of note that Lu et al ( 1998 ) proposed a method for measuring the depth where some geological processes occurred.

**Key words :** determination of the depth of geological processes ; stress state in rocks