

古构造应力场

万天丰 编著

地质出版社

古构造应力场

万天丰 编著

地质出版社

内 容 提 要

本书系统介绍古构造应力场的基本理论、室内外的研究方法与具体工作步骤。重点为半定量地研究各地质时期的空间构造应力场,为深入研究区域地质构造和各成矿时期的矿田与矿床构造提供了必要的基础知识。

本书适用于地质科研人员和高等学校的师生,对于区域地质、石油、煤田、金属与非金属矿产等专业的地质普查勘探工作者研究矿区及区域地质构造,有重要参考价值。

古 构 造 应 力 场

万 天 丰 编 著

责任编辑:王休中

地质出版社出版发行
(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷
(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: 10.25 字数: 234,000
1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷

印数: 1—1,390册 国内定价: 2.75元

ISBN 7-116-00189-1/P·173

序

近代地质科学的发展趋势，一是各分支学科之间的相互渗透，出现一些具有理论意义和应用价值的边缘学科；二是各分支学科自身的完善和现代化，包括资料数据的定量化和现象、成因与理论解释的系统化。而地质科学由其性质所决定，总要归结到历史的过程。

构造地质学是地质科学中的一个综合性学科。它在为有关的分支学科提供背景条件和取得联系渠道，特别是在沟通地质科学和地球物理学方面，起了重要的作用。狭义的构造地质学的研究方法，从传统的、把构造应力与构造应变作为单纯的、孤立的现象来解释，发展到把构造应力场作为一个整体加以研究，并把它同统一的地球物理场联系起来，把它同其形成的物质和结构联系起来，这是一个重大的发展。在这方面，我国地质界、科学界的前辈李四光教授作出了开创性的贡献。

任何构造现象都是一个复杂的历史产物。构造应力场作为空间应力场必然包含了复杂的历史叠加现象。要把时间的要素考虑进去，对构造应力场进行定向、定量和定时的研究，就必须把力学机制的分析同历史过程的分析结合起来，把构造分析同历史分析结合起来。这里，一个重要的方面是地质方法，特别是野外的分析方法。所以把构造应力场的研究扩展、深化为古构造应力场的研究又标志着一个重要的前进。应当说古构造应力场是一个具有重要潜力和深远意义的新研究领域，具有重要的理论和应用意义。

作者多年从事动力地质学和构造地质学的研究和教学，具有较深的功底。几年来为研究生开出“构造应力场”课程。本书即是以此教材的基础，根据作者本人研究成果和心得，并广泛搜集国内外的最新成果，予以综合归纳和系统总结，写成这部自成体系的简明专著，是一件值得庆贺的事。此书内容全面，论述明晰，书末又列出大量参考文献，对有志于这方面研究的科研、教学以及实际工作者都将有很大的帮助。我相信此书的出版必将对构造地质学中这一个方向的发展起到有力的推动作用。我也希望和相信今后作者在古构造应力的研究方法和资料综合方面必将取得更大的成就，使这一学科分支得到更好的发展。

王鸿祯

1987年5月于北京

前 言

本书扼要地介绍了有关古构造应力场（地质历史时期的构造应力场）的基本理论与研究方法，尽可能客观地评述了有关古构造应力场的一些有争议的问题，比较系统地综合了国内外以及笔者个人的有关研究成果（资料截止期为1984年底）并附有较齐全的参考文献目录。由于本书基本上是一种提纲性的阐述，这无论对研究者、还是对实际工作者来说，都嫌过于简略，为便于读者深入研究，凡文中所涉及到的资料均注明出处，在参考文献中都可查到。

尽管本书于1983年2月在武汉地质学院北京研究生院以内部教材“构造应力场（初稿）”的形式铅印过，在教学中许多老师与研究生又提出了很多修改意见，在提交出版社前，笔者重新编写了第二章，并对其余各章进行了修改。但是，可以肯定，此书还不成熟、还很粗糙，恳请读者对书中存在的缺点和错误提出批评指正。

现在人们对古构造应力场的研究水平还是比较低的。尽管区域地质调查工作已经遍布全国，与成矿作用有关的构造研究也在各矿区与勘探区积极进行着，但是为恢复古构造应力状态所必备的资料至今还相当缺乏。因此，虽然室内研究水平的提高也很有意义，但提高古构造应力场研究水平的关键在于加强野外地质构造的研究。我们现在要研究的古构造应力场，是一种具有确定的时间、确定的应力方向、半定量的空间应力场。要进行这样的研究，必须把构造变形机制（力学分析）的研究与形变史（历史分析）的研究结合起来，把大、中、小型和显微、超显微构造的研究结合起来，把建造研究与改造研究结合起来，并把传统的地质研究方法与近代数学、物理等以及技术科学的新成就结合起来。实现大陆岩石圈内部古构造应力场的研究，不仅在地球动力学上具有重大的理论意义，而且在实际应用中也有重要的指导作用。

在本书编写过程中，得到武汉地质学院北京研究生院及构造地质研究室的大力支持；陈明佑副教授，吕新媛老师编写和准备了第八章数学模拟部分的基础资料；庄培仁教授、王维襄教授、宋鸿林副教授、李德本副教授、游振东教授、常志忠副教授与韩玉英副教授等曾分别审阅了部分草稿，提出了许多宝贵的意见和建议；北京大学王仁教授、郑亚东副教授，国家地震局地质研究所马杏垣教授和何永年副研究员，澳大利亚 M.S.Paterson 教授，美国 R.J.Twiss 教授，国家地震局地球物理研究所鄢家全研究员，国家地震局地壳应力研究所刘光勋副研究员，福州大学陈永年副教授，地矿部情报所肖庆辉同志和我院赵其强、何浩生副教授等都热情地给予指导，解答疑问或提供有关资料；王漪萍同志承担了初稿的校对工作；我院研究生院图书馆、情报资料室和地矿部地质图书馆为资料的搜集工作给予了极大的方便。正是在这么多老师、同事和朋友的大力支持与热情帮助下，本书的编写工作才得以顺利地进行，应该说这是一项集体劳动的成果。在此笔者对他们热情帮助表示衷心的感谢。

我的前妻（曹瑞萍）拖着病残的身体，两次誊清了本书的全部手稿，并作了文字润色，遗憾的是她没能看到本书的公开出版就离开了人间。她不要求人们为她开追悼会，也

不要求保留骨灰，她不要求人们为她保留什么东西，但是她那朴实无华的作风、实事求是的态度与坚韧不拔的精神却永远留在我心中。

万天丰

1987年4月

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
一、构造应力场的概念.....	1
二、研究内容与方法.....	3
第二章 构造应力场的几个理论问题	6
一、地球内部的构造应力.....	6
二、岩石圈上部构造应力作用的时间.....	9
三、岩石圈上部构造应力的水平分量与垂直分量之比.....	10
四、岩石圈构造应力的成因问题.....	14
第三章 断裂构造与应力方向	22
一、张节理和主应力方向.....	22
二、剪节理与主应力方向.....	31
三、张、剪节理的识别.....	35
四、断层和主应力方向.....	39
五、断层的力学性质.....	43
六、韧性剪切带与主应力方向.....	44
七、共轭断裂的剪切角.....	46
八、断裂与剪应力迹线.....	52
第四章 褶皱、小构造、显微构造与主应力方向	58
一、褶皱与主应力方向.....	58
二、易确定最大主压应力方向的小构造.....	62
三、易确定中间主应力方向的小构造.....	67
四、易确定最小主压应力方向的小构造.....	67
五、显微构造与主应力方向.....	69
第五章 古构造应力的大小	76
一、岩石力学试验资料的推断法.....	76
二、数学解析的估算法.....	77
三、显微构造的估算法.....	79
四、超显微构造的估算法.....	81
五、问题讨论.....	91
第六章 古构造应力场的时空变化	96
一、应力作用过程中的构造形变.....	96
二、构造形变过程中的应力场变化.....	97

三、早期构造形变与后期应力场.....	103
四、构造应力场的分期问题.....	106
五、构造应力作用的空间范围.....	108
第七章 古构造应力场地质资料的搜集.....	110
一、区域地质构造资料的搜集.....	110
二、小构造资料的搜集.....	114
三、显微构造资料的搜集.....	117
四、图件的编制.....	118
第八章 构造应力场的模拟方法.....	124
一、物理模拟.....	124
二、数学模拟概述.....	125
三、计算程序与说明.....	128
四、数学模拟实例.....	136
参考文献.....	145

第一章 绪 论

对于构造形变,现在一般认为可以从几何学、运动学和动力学的角度来进行研究。几何学就是从构造要素的几何形态和空间组合关系上来研究地质构造,这是构造地质学研究的基础,为过去所注重研究的内容。近年来则从定量的角度,进行更深入的研究,并有了较大的发展。运动学的研究是探讨构造形变的运动图式和形变率(应变率)的。而动力学则是从构造形成机制的角度来研究的,即探索构造形变与应力状态之间的关系,这就是构造应力场研究的主要内容,也可以称为动力构造地质学。与此相似的提法,苏联的格佐夫斯基(1957)和欧美的许多学者称为构造物理学,我国李四光(1947)及部分欧洲学者称为地质力学。尽管上述提法相似,研究内容相近,但具体研究方法与侧重点仍有一定的差别。

Turner与Wiess (1963)、马杏垣等(1981)把上述几何学、运动学和动力学的研究综合起来,称之为构造解析,以此作为构造形变研究的全部内容,这种概括是有道理的。

本书所讨论的构造应力场,重点在于从动力学的观点、用地质学的方法来研究地质历史时期构造形变的形成机制(即古构造应力场),也涉及一些现代应力场的问题,并在此基础上,探讨一些与地质构造有关的理论和实际问题。

一、构造应力场的概念

在讨论构造应力场的概念之前,必须先明确常用的应力、地应力与构造应力的概念。应力(σ)即作用在物体内部任意截面的单位面积(dF)上的内力(dP),

$$\sigma = \frac{dP}{dF}$$

应力是用大小、方向及与所作用的面之间的关系等三个要素来表述的一种张量。应力在三度空间中可分解为:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

由于 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$, 上述九个应力分量可以用六个来表示, σ_x , σ_y , σ_z 表示沿直角坐标系三个坐标轴方向上的正应力分量。 τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} 表示沿三个互相垂直的平面上的剪应力分量。当剪应力分量等于零时,沿三个坐标轴方向上的正应力分量就叫做主应力分量。主应力分量的下标,经常用1, 2, 3来表示。只不过在固体力学中以张应力为正,而在岩石力学中以压应力为正。因而在下标使用上有些混乱①

① 在构造地质中,原来经常把最大主压应力轴用 σ_3 来表示,中间主应力轴为 σ_2 ,最小主压应力轴为 σ_1 。然而,近年来不少地质书刊采用岩石力学的表示方法,用 σ_1 来表示最大主压应力轴, σ_3 为最小主压应力轴, σ_2 不变。本书采用前面的表示方法

应力的单位过去在工程上一般用 kg/cm^2 或 bar ,物理学上用 dyn/cm^2 或 $\text{Pa}(=\text{N}/\text{m}^2)$,现在法定的计量单位为 Pa 或 $\text{MPa}(=10^6\text{Pa})$ 。

在三度空间中应力状态经常用三个主应力的相对大小来表述,按照 Means (1976)的划分,常用的术语有:

三向应力,指三个主应力都不等于零的状态;二向应力,指仅有两个主应力不等于零的状态;单向应力,指仅有一个主应力不等于零的状态。

基于主应力的相对大小,可分为:普通应力或多向应力,指 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$;轴向应力,指 $\sigma_3 > \sigma_2 = \sigma_1$ (轴向挤压) 或者 $\sigma_3 = \sigma_2 > \sigma_1$ (轴向拉伸)。当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 时,过去常叫静水应力状态,在地质上称之为静岩应力状态,也叫围限应力状态。

地应力为地球内部应力的统称。在地质学中我们只讨论静态的应力,即指由重力和长期构造运动所造成的应力。

静岩应力状态主要是由重力所决定的,其应力大小是深度的函数:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \int_0^Z \rho g \cdot dZ$$

式中 ρ 是岩石密度, g 为重力加速度, Z 为深度。

然而,在地球中并非到处都为静岩应力状态,尤其在地球的上层。当岩石处于多向应力状态时,通常认为这是由于存在构造应力的缘故。构造应力就是在静岩应力状态之上所附加的一种应力状态,或者说是地应力中偏离静岩应力状态的部分。

在岩石力学中经常使用应力偏量这个概念 (Jaeger和Cook, 1979)。如果把平均应力 (S) 定义为:

$$S = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

当应力偏量的主轴与主应力轴一致,并 $\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ 时,主应力偏量 (S_1, S_2, S_3) 将为:

$$S_1 = \sigma_1 - S = (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) \frac{1}{3},$$

$$S_2 = \sigma_2 - S = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) \frac{1}{3},$$

$$S_3 = \sigma_3 - S = (2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2) \frac{1}{3}.$$

如果在应力测量中排除了各种局部的偶然因素,那么这些应力偏量应该就是构造应力。

在构造地质学中,常用差应力,即最大主应力与最小主应力之差来表述构造应力的存在与大小。差应力的大小决定了构造形变作用的强度。另外,构造应力通常认为包括现代构造运动所引起的和古代构造运动所残留下来的两部分,不过至今还没有一种能够定量地将它们区分开的方法。

构造应力场就是在一个空间范围内构造应力的分布 (王仁, 私人来信)。笔者认为这个定义是比较确切的。Гзовский (1957) 把构造应力场定义为“作用在地壳某一地区内部的和由于这一地区某种变形的构造单元的发育而出现的应力总和”。此定义的涵义虽和前者相似,但不十分明确。

应力场是一种物理场,它和其他物理场,如重力场、电磁场、位势场等一样,也是物

质存在的一种形式。实物和场是物质存在的两种不同形态，两者是不可分割的、互相作用着的。实物的相互作用是通过场来实现的；场是在实物中起作用的。场还具有波动的特性，场的作用是以有限的速度传播的，在传播过程中强度逐渐减弱。空间和时间是物质运动的存在形式。场不是空间，而是在空间范围内某个物理量的按势分布。随着时间的变化，场内各点的强度和方向也将发生变化。这些都是场的基本特征。有关场的概念可进一步参阅安欧（1972）和雷德尼克（1976）的著作。

由上述场的特征，我们可以看出：研究构造应力场也应该象研究其它物理场的方法一样，离不开研究物质组成及其相互作用，以及研究它们在空间和时间中的变化。只研究地球的物质组成及其演化过程，不从其运动的空间和时间的变化上来研究构造应力场，显然是不行的；反之只研究构造运动的空间和时间的变化，而不注重研究物质本身及其相互作用，也是不行的。

应该说构造应力场与实际的构造形变是不相同的，它不是一种直观的东西。在野外，我们能够直接观察到的是各种各样的构造形变，而不会一下子就看出古构造应力场的存在。初看起来杂乱无章、错综复杂的构造形变，是不容易弄清其内在的组合规律。为了要掌握构造变形的空间分布规律，必然要求掌握其形成机制。李四光（1973）曾精辟地指出：

“各种构造迹象，包括矿物颗粒在三度空间排列方位的规律性，是岩石在构造应力场中应力作用的反映”。尽管在构造变形过程中，形成的构造尺度相差很大（ 10^6 — 10^{-9} m），形成时的物理条件（温度、压力）、化学环境也可以各不相同，母岩的岩性可以千差万别，因而构造形变的类型截然不同。然而这些尺度不同、形成条件不同、类型不同的构造变形在某一地区和某一时间内，都可以是同一构造应力场作用下的产物。构造应力场正是决定这些构造形变空间分布规律的关键。用这种研究构造应力场的方法来掌握复杂的构造变形的空间分布规律显然是有利的，这就是为什么我们要用构造应力场来抽象、概括构造形变的原因。

二、研究内容与方法

古构造应力场研究的主要内容是在确定各地的点应力状态（应力方向与大小）的基础上，研究在一定区域范围内各个构造活动时期的构造应力分布。

我们现在讨论的古构造应力场应当是一个空间应力场，而不能仅仅进行平面应力分析。因为仅仅进行平面应力分析过于粗略，真实的应力状态必定是三度空间的，绝大多数的主应力方向既不是真正水平的，也不是垂直地球表面，而都是倾斜的。只有进行空间应力分析才能较客观地反映实际情况。

在构造应力状态研究中，我们要确定三方面的问题，可概略地表述为“三定”——定时、定向、定量。

定时问题 就是要着重研究各地质时期构造形变的相对次序，再跟生物化石与同位素年龄资料相配合，以确定各构造应力状态的不同形成年代。

定向问题 就是用各种构造形变来确定某一时期内构造应力的方位，即三个主应力轴方位，通常最关心的是最大主压应力轴（ σ_3 ）的方位。关于这个问题20年代就开始有人进行研究，40年代起李四光（1947）与格佐夫斯基（1957）曾大力倡导过。不过由于争论问

题太多,相当一段时间内进展不大。近年来用各种构造形变来反演构造应力方向的方法日趋完善,争论问题已逐步得到解决,有了许多新进展。

定量问题 此问题长期以来一直是个难题。70年代末,由于采用了许多新方法与新技术,面貌为之一新,取得了一些可喜的成果,使其进入了一个比较完整地研究应力场的新阶段,即不仅能确定古构造应力的方向,而且也能半定量地估算古构造应力的^{大小}。古构造应力值的估算已经完全可以有把握地达到数量级的精度。所以这里所谓的“定量”,到目前为止,还只是半定量而已。现在可以利用数学解析法、方解石和白云石的机械双晶和在透射电镜下观察的晶体内位错密度、动力重结晶颗粒大小与亚颗粒大小等方法来估算古构造应力值。

在进行古构造应力场的研究中,最基本的方法是在弄清构造形变的^{空间分布及其运动特征}的基础上进行的,即利用岩石中已存在的构造形变特征来反推形变作用发生前后的构造应力状态。这种可被利用的构造变形可称之为具有应力感的构造。对于这些具有应力感的构造形变,本书第三章与第四章将分别较详细地讨论它们形成时的应力状态以及如何使用它们的^{空间产状}来反推主应力方向。为了使研究深化,我们不仅采用大、中型尺度的构造形变来恢复古应力状态,而且还使用小型构造与显微构造(包括超显微构造),尤其是中、小型构造与显微构造,它们在野外常保存完好,叠加、交切等关系清楚,十分有利于把构造形变史与形成机制的研究结合起来,获得比较完整的各个地质历史时期的构造应力分布特征及空间范围。

用上述地质方法来研究的古构造应力场,应该说还有相当大的局限性。大中型构造形变(褶皱、断裂)是强度较大的构造应力作用的产物。小型或显微构造不仅可以反映强度大的,而且也可以反映强度小的构造应力作用。在构造应力作用极其微弱的时候,几乎不产生什么构造形变,要研究这种情况下的构造运动,只能借助岩相古地理的变化和古地磁的研究来解决部分问题。

从全面地研究构造运动的角度来看,构造应力场是适合于研究岩石圈构造运动相对剧烈时期的,常常是地层缺失、形成角度不整合的时期;而岩相古地理的研究或者说建造的研究则侧重于构造运动相对稳定时期的。要完整地研究岩石圈构造运动演化历史或者说构造应力场的演化历史,把构造形变(改造)与岩相古地理(建造)(李四光,1973)或者说把力学分析与历史分析(张文佑等,中国科学院地质研究所大地构造编图组,1974)结合起来进行研究,实在是十分有益而且必要的。这一原则不仅对构造地质理论研究,如大地构造、岩石圈构造应力场研究;而且对许多应用课题中的构造研究,如区域地质调查,矿田与矿床构造研究、地下冷水与热水的找寻等,都是适用的。

古构造应力状态很难用仪器直接测量。尽管在用仪器直接测量现代应力状态时,其中也可包括一部分古代残余构造应力,不过至今还不能有效地将它们区别开来。

除地质研究方法之外,构造应力场还有模拟研究方法,即包括各种物理模拟与数学模拟(用有限单元法在电子计算机上进行计算)。尽管任何模拟方法都是近似的研究方法,但是由于模拟方法的不断改善,特别是数学模拟方法,可以尽可能真实地选用各种实测的参数来进行计算,这样不仅可以半定量地恢复某一时期的构造应力状态,而且还可以得到更多的信息,以利于全面认识该区构造形变的分布规律,为深部和外围构造预测工作提供线索。

现在已经可以运用构造应力场的研究成果，来预测一些矿床与矿田，指导水文地质、工程地质研究与热田勘探，以及为研究地震活动规律和地震预报工作提供线索。

构造应力场的工作步骤与一般地质工作的步骤是类似的，都是从野外实际资料的观察、测量工作开始，经过整理、综合，然后再进行室内模拟研究；在资料搜集时都是本着由点到面、由面到空间的原则进行的；研究工作都是从观察现象开始，深入分析，进而来探索事物的本质。

构造应力场中应力方向的分布状况通常用主应力迹线或剪应力迹线来表示，这两种表示方法是等效的。应力场的强度常用主应力或剪应力等值线来表示。

第二章 构造应力场的 几个理论问题

在构造应力场研究中有几个理论问题一直为大家所关注：构造应力在地球内部的分布状况；构造应力积累的时间长短；其水平分量与垂直分量的比值；以及构造应力场的成因问题。对于这些困难的理论问题，尽管过去也有不少人作过回答，但是在大量新资料的面前则发现问题并不简单，有关这些问题的探讨至今仍在进行之中。这里只能将现代的一些代表性认识介绍一下，以促进更深入的讨论。

一、地球内部的构造应力

根据地球表面各地质历史时期以至现代所观察到的构造形变，人们都确信在地球表层肯定存在较强的构造应力场。然而深部的情况又如何呢？这是大家一直都在关心的问题。

早在20世纪初叶一些地球物理学家就从重力场的研究中形成了对于整个地球应力状态的一些观点，但是比较确切的结论还是1957年人造卫星发射成功之后才得到的。现在大家都公认地球是一个旋转椭球体，其扁率为

$$f = \frac{a - b}{a} = \frac{1}{298.25} = 0.0033529$$

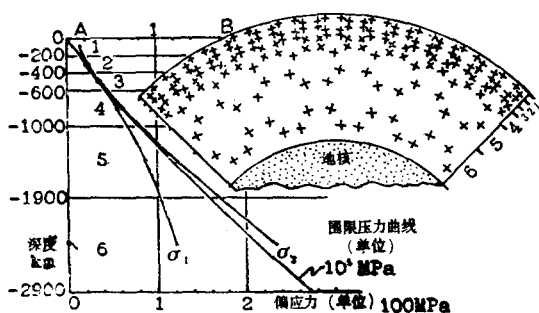


图 2—1 在重力场作用下的初始应力状态
(据Bullen, 1965)

A.主应力值；B.主应力方向

式中 a 为赤道半径， b 为两极半径。如果假设地球内部每一点应力都处于静岩应力状态（即围限压力状态），而其它参数都与地球的实际情况一样，其扁率经计算应该为 $1/299$ 。这叫做理想的静岩应力状态下的地球扁率。这说明地球真实的扁率与理想状态的扁率是很接近的，差值极小，由此就可推论地球内部应力场是非常接近于静岩应力状态的。

然而地球表面岩石圈的构造活动是明显的，不可能处于静岩应力状态。强度较大的固体岩石圈是能够承受差应力的。而在岩石圈之下的软流圈（约在地面以下100km左右）以及地球更深的部分（地幔的主体与地核），一般都认为只能承受非常小的差应力，也就是说基本上是处于静岩应力状态（王其允，1980）。

表 2—1 地壳和地幔各层的物理参数
(据Bullen, 1965)

层	杨氏模量 (10^{12}dyn/cm^2)	泊松比	屈服极限 (10^{12}dyn/cm^2)	密 度 g/cm^3	重力加速度 cm/s^2
1	3.39	0.272	1×10^{-3}	1.73	987
2	3.60	0.279	"	2.19	997
3	4.00	0.282	"	3.10	1001
4	4.56	0.276	"	4.57	997
5	5.84	0.286	"	4.99	988
6	7.39	0.296	"	5.49	1004

Bullen (1965) 认为软流圈之下深约400km附近才几乎没有差应力, 其上下都存在差应力(图2—1, 表2—1) 只不过在地幔深部静岩应力很大, 相比之下差应力是微不足道的。例如在地下2000km处静岩应力约20000MPa, 而差应力仅为100MPa^①左右。然而这种差应力, 或者说构造应力, 在地球表层岩石圈中的影响却是不可忽视的, 对地球表层构造运动有着决定性的作用。

Mercier (1980) 从流变变质岩石学的实验资料出发, 用地质温度—压力计(主要用橄榄石重结晶颗粒大小, 详见第五章), 来推断大陆岩石圈各部分的构造应力大小(图2—2)。他推算出在裂谷带50 km深处约为8 MPa, 60 km深处以下降为2 MPa左右。根据岩石强度估算, 大陆张性地带在地壳浅处可达200MPa; 在地壳下部, 差应力可能为80 MPa; 在50—70km深处, 差应力可以从45MPa降为5 MPa左右。而在大陆刚性地块内部的地幔中, 100—200 km深处差应力约从15MPa降为5 MPa。

现在一般都认为岩石圈中构造应力较大, 而在深处, 构造应力(即差应力)减小。对于岩石圈内构造应力值, 多数人估计为上兆帕斯卡的数量级, 但至今还没有一种公认的测量、计算方法, 目前主要是用各种间接的方法来进行估算。

Wyss (1970) 曾用地幔长周期调频波谱和体波来研究南美安第斯山地震带37个地震活动资料, 他把地震前的初始应力与震后最终应力的平均值叫做视平均应力, 即实际平均应力的下限。他发现地震的总剪切应力与视平均应力值约呈10:1的比例关系。从而推算出从地表到40km的深处, 地震的总剪切应力至少为20MPa; 100km深, 约为300MPa; 而在600km深处; 约为44MPa。

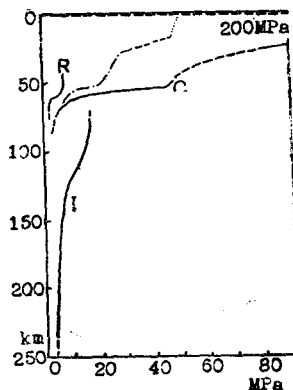


图 2—2 大陆岩石圈构造应力剖面图
(据Mercier, 1980)

纵座标为深度(公里); 横座标为差应力值(MPa); R. 裂谷的曲线; C. 大陆张性带的曲线[近地表部分用虚线表示, 据岩石强度资料, 应力值最高约达200 MPa]; I. 大陆刚性地块内部的曲线

① 1MPa = 10^6 Pa, 下同

Turcotte等(1980)用应力与温度分布的稳态模型来模拟圣安德列斯断层剪应力随深度变化的关系(图2—3)。他们假设了五种模型,摩擦系数取0.15—0.6之间。假设上述摩擦系数是用于断层带上部的脆性带,而断层带下部是韧性带,那里假设发生了热动力蠕变。计算结果表明当有效摩擦系数接近0.15时,脆性带的深度为14.2km(图2—3, A)在那个深度上具有最大的剪应力值为56MPa,这个深度正好相当于圣安德列斯断层上最深的震源深度。如果摩擦系数为0.6时,断层面上剪应力最大值127MPa的深度约为8 km(图2—3, B)。在莫霍面以下时,剪应力均趋于零。当摩擦系数为0.15时,估算的热流值大约为29.3mW/m²,而摩擦系数为0.6时,热流值需达75.2mW/m²。然而实际上在圣安德列斯断层附近,没有获得可测量的热流异常。所以,他们认为在该断层面上最大剪应力将不超过100MPa。

McNutt(1980)从区域重力异常大小推算岩石圈应力的大小,他认为从全球角度来看,最大差应力为20—200MPa。根据重力异常和地形特征所反映的大洋岩石圈上部30—40km范围内存在区域性差应力,其数量级为100MPa。大陆岩石圈由地形起伏而造成的应力差应该不超过100MPa。Watts等(1980)从岩石圈挠曲的观察来推断大洋岩石圈的应力

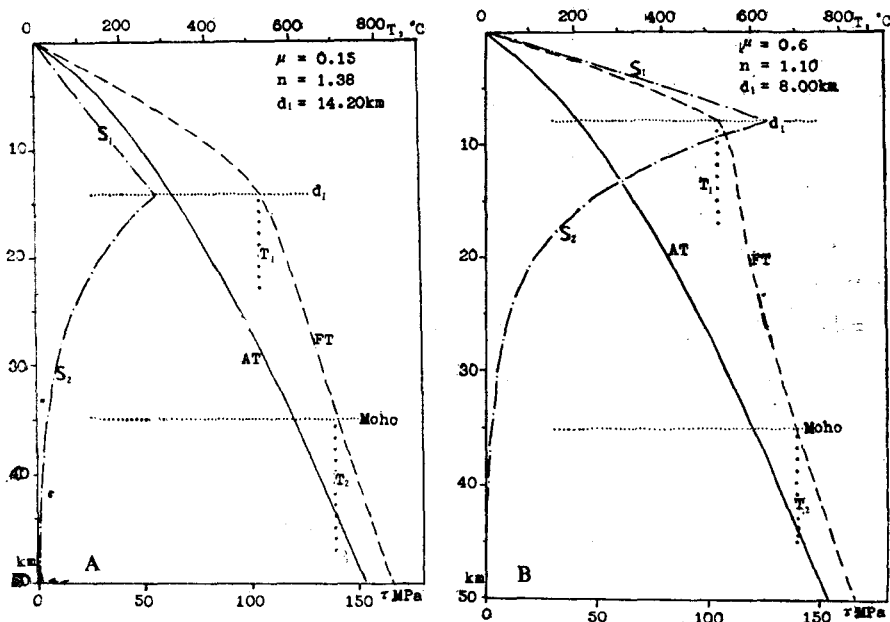


图 2—3 圣安德列斯断层周围温度、断层面温度($T^{\circ}\text{C}$)与断层面剪应力(τ , MPa)随深度(km)变化的模拟关系图(据Turcotte et al, 1980)

A, $\mu = 0.15$; B, $\mu = 0.6$; μ 为摩擦系数; AT, 周围温度曲线; FT, 断层面温度曲线; S, 断面上的剪应力; S_1 , 剪应力, $\tau = \mu \rho g y$; S_2 , 剪应力 $\tau(y) = \tau_0 e^{(1-(y/d_1)^n)}$; T_1 , 二氧化硅湿样的最高温度(523 $^{\circ}\text{C}$); T_2 , 硅酸镁(Mg_2SiO_4)湿样的最高温度(697 $^{\circ}\text{C}$); d_1 , 断层面上剪应力最大值的深度; Moho, 莫霍面的深度

小于300MPa。Lambeck(1980)从局部均衡补偿所推断的岩石圈最大差应力约为50MPa。

然而, Kirby(1980)根据各类岩石的脆性—韧性实验变形来推断岩石圈上半部的构造应力与强度极限,并用代表性的橄榄石流变来模拟大洋岩石圈随深度与板块年代而变化的极限强度分布。他认为随着长时间的流变,岩石的极限强度可大幅度地增加,在压缩条件下,30—40km深处,经过6000万年以上的流变,岩石极限强度可增大到1500MPa以上;

而在伸张条件下, 40—60km深处, 经6000万年以上的流变, 岩石极限强度可增大到1000 MPa以上。他的估算结果比别人要大一个数量级。

Brace及Kohlstedt (1980) 认为从实验室的岩石力学试验仅能得到岩石最大应力差, 即当岩石能保持某种压力、温度和应变速率时的最大应力差, 也可称为强度。他根据石英和橄榄石的力学试验, 对比了浅层现场应力测量资料, 假设浅层岩石是断裂的, 断裂面的摩擦力控制着有效应力, 在15—25km以下的深处, 石英或橄榄石的蠕变分别控制着应力, 从而认为在深度为25km的面上(石英流变)和在深度为50km的面上(橄榄石流变)以及在后者以下, 岩石圈有接近于零的强度。根据推算, 如果认为岩石是干的($\lambda = 0$) (图2—4), 由石英的流变资料推算25km深处, 当水平拉伸时, 最大强度为300MPa; 而在水平压缩条件下最大为850MPa。根据橄榄石的流变资料推算50km左右深处时, 水平拉伸条件下, 最大强度为700MPa; 水平压缩条件下最大强度为1500MPa。如果压力为静水孔隙压力的话($\lambda = 0.42$), 对石英来说, 最大强度将会降为200MPa或600MPa; 而对橄榄石则会降至450MPa或1100MPa。当孔隙压力等于静岩压力的时候($\lambda = 1$), 则构造应力就会降低到零, 此时的总应力是静压力并且与垂直应力相等。遗憾的是, 目前对于岩石圈深部孔隙压力的大小知道得太少了, 所以对“ λ ”这个参数几乎无法约束, 因而对于岩石圈内构造应力差的数值还不能进行更确切的讨论。

看来, 岩石圈内最大的构造应力可达上百MPa的数量级, 岩石圈的深部构造应力可能

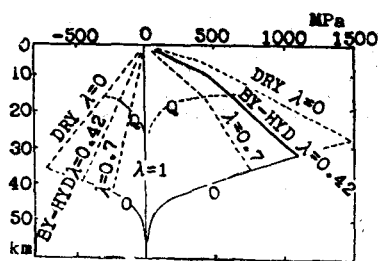


图 2—4 垂直应力(深度的函数)与最小或最大水平应力之间的变化关系
(据Brace及Kohlstedt, 1980)

纵座标为深度; 横座标为最大(右)与最小(左)水平应力(单位MPa); λ 为孔隙压力的比例; $\lambda = 0$ 为干燥(DRY)试样的条件, 孔隙压力为零; $\lambda = 0.42$, 为符合拜利(Byerlee)定律的静水孔隙压力的条件(BY—HYD); $\lambda = 1$, 孔隙压力等于静岩压力, 此时无应力差。

Q为石英的流变线;
O为橄榄石的流变线。 } 它们的应变速率均为 $10^{-15}/s$;
地温梯度 $T (^{\circ}K) = 350 + 15z (km)$

迅速下降为几十MPa, 以至几MPa; 在岩石圈以下的地幔中, 构造应力与静岩应力相比是微不足道的, 基本上接近于静岩应力状态, 这就是现在对于构造应力在地球内部分布的基本认识。

二、岩石圈上部构造应力作用的时间

存在于地球内部的构造应力场都有一定的作用时间。在漫长的地质历史时期中, 不同时期, 应力作用的特征不同, 强度也不同, Means (1976) 曾特别强调了应力场的瞬时特征, 他认为“应力场就是在任何岩体中, 每一个点的应力状态及其瞬间的空间排列”。他