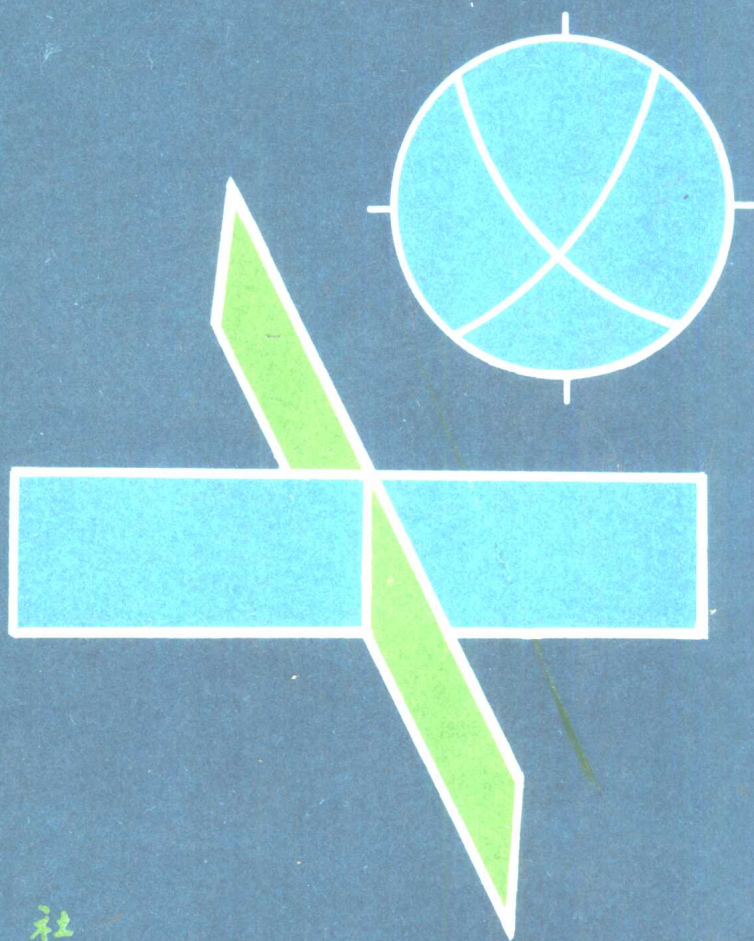


震源机制变化的机理

——转换应力场

魏柏林 著



地震出版社



震源机制变化的机理
——转换应力场

魏柏林 著

地震出版社

1994

(京)新登字 095 号

内 容 提 要

在系统研究唐山、海城、松潘等一系列大地震的基础上,以大量的事实论证了不同构造环境下产生的不同类型、不同序列特征的地震,其震源机制解是千变万化的。究其原因,应是在统一构造应力作用下,岩块沿断裂滑动过程中所产生的转换应力场引起的剪切破裂所致。并且还就裂谷带、碰撞带、贝尼奥夫带和水库地震震源机制变化的规律及其原因,作了综合探讨。最后根据发震构造的多种类型和丰富的前兆资料信息,提出了转换应力场与孕震的热破裂模式,并用该模式以解释发震构造形式及各种前兆现象形成的机理。

震源机制变化的机理——转换应力场

魏柏林 著

责任编辑:何寿欢

责任校对:庞娅萍

*

地质出版社 出版

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 11.25 印张 288 千字

1994 年 12 月第一版 1994 年 12 月第一次印刷

印数 001—500

ISBN 7-5028-1015-3/P·701

(1408) 定价: 10.00 元

前 言

1977年10月19日,广西平果发生5.0级地震。当时国家地震局广州地震大队(1979年后改名为广东省地震局),立即派出科技人员,携带4台DSL-1型地震仪,赴现场监测地震发展趋势。主震发生后,发现平果余震机制解明显与主震震源机制解不一致。为何在统一构造应力场作用下,同一个地震序列会出现不同的震源机制解?查阅了国内外有关文献,对这个现象有几种不同的解释:(1)“错动过头”理论,首先由T. J. Fitch和C. H. Scholz (1972)提出,试图用此来解释日本西部所出现的震源机制解的不一致性;之后,顾浩鼎和陈运泰等(1975)对此理论作了详细阐述和发挥,并用此理论解释海城地震系列中几例与主震不协调的震源机制解;(2)“液体流出的下陷”假说,F. F. Evison (1973)在研究了1968年5月23日新西兰伊南加华7.1级地震序列后,用“液体流出的下陷”假说来解释晚期余震的震源机制解与主震的不一致性。此外,还有“断层分叉”等等假说。作者在充分研究了平果、海城、伊南加华、邢台、唐山等地震序列的震源机制解后发现,这些地震的余震与主震震源机制解的不协调现象,不仅在成因上与主震或主破裂面有一定的联系,而且在组合上也是有规律的。这种现象的发生,用“错动过头”理论无法解释,用“液体流出的下陷”假说更难说明,用其他的解释也不能令人满意。为此,作者经过大量震例的研究和对比,同时,在陈国达教授提出的新的大地构造理论“动定递进转化”说的启发下,在威尔逊教授“转换断层”的新概念影响下,提出了“转换应力场”来解释震源机制变化的机理。这一观点首次反映在作者1980年在《地球物理学报》23卷1期《余震震源机制变化原因》论文中。嗣后,在分析研究了1976年松潘地震、龙陵地震和鲜水河断裂带一系列地震的震源机制解后,又发现类似的现象,于是,在《地震研究》8卷2期上发表了《炉霍、松潘和龙陵地区发震构造型式的讨论》。1981年广东省海丰发生了一串小震群,广东省地震局布了四个流动地震台,作者一直在现场监视地震活动,系统地从1800多次小震中选出137个4个台有清楚P波初动资料的地震,作出综合叠加的震源机制解,发现有6个类型的震源机制解皆可用转换应力场引起的新的剪切破裂来解释。在此,由转换应力场引起的剪切破裂类型十分齐全,既有走滑的,亦有正、逆倾滑的。于是,作者于1983年在《地震学报》5卷4期上发表了《海丰地震发震构造型式的讨论》一文,进一步阐述了转换应力场所引起的剪切破裂是震源机制变化的原因。后来,作者又研究了贝加尔湖裂谷带与莱茵地堑等的地震震源机制解和碰撞带喜马拉雅褶皱带的地震的震源机制解,还系统搜集了板块俯冲带即贝尼奥夫带的由浅到深的震源机制变化的规律,用转换应力场理论都能完满地解释其中震源机制的变化。为了系统地总结描述这种地震现象的特点并与主干破裂及共轭破裂的发震构造作比较,作者在《发震构造的一种新型式——转换破裂型》的论文中,指出5个方面特点。此论文曾参加了在京召开的“INTERNATIONAL WORKSHOP ON CONTINENTAL LAYERS”会议上交流,并于1991年在会议论文集刊出。

本书就是在上述系列研究的基础上,作进一步全面的总结和阐述。在系统论述各种形式构造环境所产生的不同类型、不同序列特征的地震中,虽然,其震源机制解千变万化,但究其变化的原因,应是在统一构造应力场作用下,岩块沿断裂滑动过程中所产生转换应力场所

引起的新的剪切破裂所致。同时，以大量事实论证各种断层类型和各种构造环境出现的震源机制变化的特征，概括这种新的剪切破裂——转换破裂型地震属性上的差异。并且，还就裂谷带、碰撞带、贝尼奥夫带和水库地震震源机制变化的规律及其原因，作综合探讨。最后，根据发震构造的多种类型和丰富的前兆资料信息，提出转换应力场与孕震的热破裂模式，并试图用该模式解释发震构造形式及各种前兆现象形成的机理。期望能对地震预报的实践与探索起到抛砖引玉的作用。本书因涉及的面比较广，使用的资料比较多，加之作者水平有限，错漏之处在所难免，敬请批评指正。

作者衷心感谢国家地震局震害防御司和广东省地震局给予出版经费的赞助。

THE CAUSE OF CHANGE OF FOCAL MECHANISM —TRANSFORM STRESS FIELD

Wei Bailing

Preface

Immediately as the earthquake (M_s 5.0, Oct, 19, 1977) broke out at Pingguo, Guangxi Province, Guangzhou Seismological Brigade of State Seismological Bureau, which named as Guangdong Seismological Bureau since 1979, sent technicians with four DSL-1 seismographs to monitor seismicity. We have found that the focal mechanism solution of aftershocks was different to that of main shock. Why the same earthquake sequence had different mechanisms by the uniform tectonic stress field? There were several kinds of explanation to this problem according to literature home and abroad as follows; the first was the overshoot theory offered by T. J. Fitch and C. H. Scholz in 1972; in the light of the theory, they tried to explain the inconsistency of focal mechanism at the Benioff zone in Western Japan; and then, professors Gu-Haoding and Chen Yuntai made detail explanation and extension to the theory and explained the inconsistency of focal mechanism between main shock and aftershocks of Haichen earthquake sequence. The second was hypothesis of subsidence following an outflow of pore fluid. Having studied the earthquake (M_s 7.1, May 23, 1968) at Inangahua, New Zealand, F. F. Evison explained the inconsistency of focal mechanism between main shock and aftershocks by this hypothesis in 1973. And besides the above two, there were fault bifurcation and other hypotheses. Having studied enough about the focal mechanism of earthquake sequences of Pingguo, Haichen, Inangahua, Xingtai and Tangshan, we found the inconsistency of focal mechanism was connected with the section of main shock or rupture and appeared regularly in assemblage. This phenomenon can't be interpreted by overshoot theory, hypothesis of subsidence following an outflow of pore fluid or any other hypotheses. Therefore, having studied and compared a lot of earthquake events, enlightened by the move-stop progress transforms theory of professor Chen Guoda and influenced by new concept of transform fault of professor J. T. Wilson, we provided our view to explain the change of focal mechanism by transform stress field. This view first appeared in our thesis "Cause of Change of Focal Mechanisms of Aftershocks" (ACTA Geophysica Sinica, Vol. 23, No. 1, 1980). And then, we also found the similar case in studying focal mechanism of earthquake sequence such as Songpan, Longling and Xianshuihe faults in 1976. We collected the idea in the paper "Study of Seismo-Genetic Tectonic Patterns of the Luhuo, Songpan and Longling Areas" (Earthquake Research, Vol. 8, No. 2). When a series of small earthquakes occurred at Haifeng,

Guangdong Province in 1981, Guangdong Seismological Bureau placed four portable seismic stations to monitor the seismic activity at the site. Having picked up 137 earthquakes with clear initial P wave at the four stations from 1800 small earthquakes and made synthetic focal mechanism solution, we found that there were six types mechanisms which could be explained by the new shear fracture of transform stress field; and the fracture were complete, including strike slip, normal and inverse dip slip. So we made a detail study about the view that the cause of change of focal mechanism was the shear fracture of transform stress field in the paper "Study on the Types of Earthquake Faulting of the Haifeng Earthquake Swarm" (ACTA Seismologica Sinica, Vol. 5, No. 4, 1983). And later, we made the focal mechanism solution of Baikal rift, Rhine graben and Himalayas fold zone; we collected the data of changing laws of focal mechanism from shallow to deep in Benioff zone. All the change of focal mechanism could be explained well by the theory of transform stress field. In order to describe the characteristics systematically and compare with trunk rupture and conjugate fracture, we pointed out that there were five differences from above two fractures in the paper "A New Type, the Transform Rupture Type", which was collected in the Proceedings of the International Workshop on Continental Layers, convened in Beijing in 1991.

On the basis of above studies, we made further conclusions in this book. While discussing earthquake of different types and characteristics of different tectonic environment, we found that the cause of change of focal mechanism was the new shear fracture of transform stress field, formed by the slipping of rock along the fault plane in the uniform tectonic stress field. Meanwhile, we demonstrated the characteristics of change of focal mechanism in all kinds of fault types and tectonic environment; we outlined the attribute difference of this earthquake type of new shear fracture and transform fracture; we also made a synthetic discussion on the cause and laws of change of focal mechanism of reservoir-induced earthquakes and earthquakes in the graben, collision and Benioff zones; and finally, according to many types and precursory information, we put out the concept of transform stress field and seismogenic model of thermal rupture which may explain the forming mechanism of different precursory and types. We hope that we can offer a few commonplace remarks by way of introduction, so that others may come up with valuable opinions in earthquake prediction. For this book involves large contents and data, and our knowledge is limited, there may be many errors in this book. Please make your comment.

目 录

第一章 应力与应变	(1)
一、外力及其类型	(1)
二、应力	(2)
三、应变	(9)
第二章 岩石力学性质及其影响因素	(15)
一、岩石力学性质	(15)
二、岩石强度和影响强度的因素	(18)
第三章 破裂与粘滑	(22)
一、脆性破裂	(22)
二、粘滑现象	(27)
三、影响粘滑的因素	(28)
第四章 构造应力场	(30)
一、构造应力场概述	(30)
二、构造应力场的时空变化	(32)
三、测定构造应力场的方法	(43)
第五章 转换应力场	(51)
一、转换应力场的基本特征	(51)
二、转换应力场引起地质构造的变化	(53)
三、转换应力场引起地貌的变化	(55)
四、转换应力场引起地形的变化	(57)
五、转换应力场在地震时引起地表的破坏	(60)
六、转换应力场引起震源应力场的变化	(61)
七、转换应力场成因	(74)
八、转换应力场的组合类型	(78)
九、震源应力场、转换应力场与构造应力场的关系	(81)
第六章 转换应力场引起裂谷带和拉张区震源机制的变化	(83)
一、板间裂谷带震源机制的变化	(83)
二、板内裂谷带震源机制的变化	(87)
三、转换应力场引起裂谷带和拉张区震源机制的变化	(95)
第七章 转换应力场引起碰撞带和挤压区震源机制的变化	(98)
一、地中海阿尔卑斯碰撞带	(98)
二、扎格罗斯碰撞带	(101)
三、帕米尔—兴都库什碰撞带	(102)
四、喜马拉雅碰撞带	(105)
五、转换应力场引起碰撞带和挤压区震源机制的变化	(109)

第八章 转换应力场引起贝尼奥夫带震源机制的变化	(112)
一、贝尼奥夫带概述	(112)
二、贝尼奥夫带的构造位置	(114)
三、贝尼奥夫带震源机制变化	(117)
四、贝尼奥夫带震源机制变化的原因	(121)
五、讨论	(125)
六、结语	(127)
第九章 转换应力场与水库地震	(128)
一、活动区型的构造环境	(128)
二、 T 轴稳定 P 轴旋转的震源应力场	(134)
三、转换应力场与引张应力场	(139)
四、库水和应力的联合诱震作用	(141)
五、初步结论	(143)
六、建议	(144)
第十章 转换应力场与孕震热破裂模式	(145)
一、地震的空间分布	(145)
二、发震构造型式	(147)
三、震前前兆变化	(155)
四、热—破裂模式	(160)
参考文献	(165)

CONTENTS

CHAPTER 1 STRESS AND STRAIN	(1)
I External Force and Its Patterns	(1)
I Stress	(2)
I Strain	(9)
CHAPTER 2 FEATURE OF ROCK MECHANICS AND ITS INFLUENTIAL FACTORS	(15)
I Feature of Rock Mechanics	(15)
I Strength of Rock and Its Influential Factors	(18)
CHAPTER 3 RUPTURE AND STRIKE SLIP	(22)
I Brittle Fracture	(22)
I Strike Slip Phenomenon	(27)
I Influential Factors to Strike Slip	(28)
CHAPTER 4 TECTONIC STRESS FIELD	(30)
I Survey of Tectonic Stress Field	(30)
I Evolution of Tectonic Stress Field in Time and Space	(32)
I Methods of Measuring Tectonic Stress Field	(43)
CHAPTER 5 TRANSFORM STRESS FIELD	(51)
I Brief Characteristics of Transform Stress Field	(51)
I Change of Geological Tectonic by Transform Stress Field	(53)
I Geomorphologic Change by Transform Stress Field	(55)
I Change of Topography by Transform Stress Field	(57)
I Surface Damage by Transform Stress Field in Earthquake Occurrence	(60)
I Change of Focal Stress Field by Transform Stress Field	(61)
I Origin of Transform Stress field	(74)
I Composite Patterns of Transform Stress Field	(78)
I Relation of Focal, Transform and Tectonic Stress Fields	(81)
CHAPTER 6 CHANGE OF FOCAL MECHANISM IN GRABEN AND STRETCHING ZONE BY TRANSFORM STRESS FIELD	(83)
I Change of Focal Mechanism in interplate Graben Area	(83)
I Change of Focal Mechanism in Plate Graben Area	(87)
I Change of Focal Mechanism in Graben and Stretching Zone by Transform Stress Field	(95)

CHAPTER 7 CHANGE OF FOCAL MECHANISM IN	
COLLISION AND COMPRESSIONAL ZONES	
BY TRANSFORM STRESS FIELD	(98)
I Collision Zone of Mediterranean Sea and Alpides	(98)
I Collision Zone of Zagros	(101)
II Collision Zone of Pamirs-Hindukush	(102)
IV Collision Zone of Himalayas	(105)
V Change of Focal Mechanism in Collision and Compressional Zones	
by Transform Stress Field	(109)
CHAPTER 8 CHANGE OF FOCAL MECHANISM IN	
BENIOFF ZONE BY TRANSFORM STRESS FIELD	(112)
I Survey of Benioff Zone	(112)
I Tectonic Location of Benioff Zone	(114)
II Change of Focal Mechanism in Benioff Zone	(117)
IV Cause of Change of Focal Mechanism in Benioff Zone	(121)
V Discussions	(125)
VI Conclusions	(127)
CHAPTER 9 TRANSFORM STRESS FIELD AND	
RESERVOIR-INDUCED EARTHQUAKE	(128)
I Tectonic Environment in Active Zone	(128)
I Focal Stress Field with Stable T-axis and Rotary P-axis	(134)
II Transform Stress Field and Stress Field with Dominant Tension	(139)
IV Earthquake-Induced Action of Reservoir Water and Stress	(141)
V Preliminary Conclusions	(143)
VI Suggestion	(144)
CHAPTER 10 TRANSFORM STRESS FIELD AND	
SEISMOGENIC MODEL OF THERMAL RUPTURE	(145)
I Distribution of Earthquakes in Space	(145)
I Seismo-Genetic Tectonic Patterns	(147)
II Change of Precursory Before Earthquake	(155)
IV Model of Thermal Rupture	(160)
REFERENCES	(165)

第一章 应力与应变

地球的构造运动促使了地球内部物质发生了各种方式的大规模的移动。物质的上下移动导致了垂直作用力的产生，而物质的水平运动则将产生水平作用力；而它们之间又可相互转化。地壳上的各种地貌形态，各种构造类型都是这两种力相互作用的结果。由于这些力的长期作用，可使岩层产生永久的连续变形，如各种类型和不同规模的褶皱。当作用力超过了岩石的破裂强度，于是断续变形就出现，这就是发育在地壳上各种类型和不同规模的断裂。而断裂开始出现的瞬间，一般都是以快速破裂位错的形式出现，这就是地震。后期断裂活动既有快速的滑动，也有缓慢的蠕动，这些变形的产生，与外力作用、岩石内部的应力应变、岩石强度以及当地物理化学环境都有密切的关系。

一、外力及其类型

地壳是由沉积岩、火成岩和变质岩组成的。显然，地壳内的地震主要发生在这三套岩石中，是岩石的突然破裂，是断层的快速错动在地表所产生的效应。岩石本身具有一定的强度，只有在一定的外力作用下，才能引起岩石内力和变形。而当外力作用引起岩石内力和变形超过岩石的破裂强度时，岩石发生破裂，即发生地震。

外力和内力是一个相对概念。它可以相互转化，依研究对象而起变化。外力是外部施加给研究对象产生的力；内力是研究对象在外力作用下，在其本身内部引起变形的力。如月球和太阳对地球的引力，我们称做外力，而地球因此而产生变形的力叫内力。又如喜马拉雅地槽褶皱带，我们将印度和欧亚板块相对运动产生的挤压力叫做外力，而喜马拉雅地槽褶皱带因此而产生内部变形的力叫内力。再如在喜马拉雅地槽褶皱带内的逆断层面的推覆体对前面岩块产生的挤压变形，推覆体可叫外力，而推覆体前面岩块产生挤压变形的力叫内力。同理，当岩块在构造应力场作用下沿断裂产生移位时，构造应力场是外力，而移动的岩块内部产生了与构造应力场相适应的应力分布，这是岩块所产生的内力。但岩块沿断裂移动的过程中，对前面相邻接的岩块产生挤压，对后面的邻接岩块可产生引张。于是岩块的运动对前、后邻接岩块来说叫外力，而对前面邻接岩块产生平行运动方向的挤压作用而导致的应力分布，与后面邻接岩块产生平行运动方向的应力分布是完全不一样的，这种因岩块滑动所引起的应力重新分布，可分别称之为前后邻接岩块的内力。由此类推，当研究大范围物体是内力时，那么它对相对小范围的物体作用，它本身就变成外力了，而较小范围的研究对象又变成内力了。

（一）力的三要素

力是使物体改变运动状态和改变其体积和形状的一种向量。它有一定大小、方向和作用点。对理想刚体来说，外力作用点在一定范围按一定规则变动而并不影响这些力对刚体运动或平衡所产生的效果。力可按平行四边形法则进行分解和合成。然而组成地壳的岩石并非刚体，而是弹性体或弹塑性体，它是可以变形的。对此，力的作用点非常重要，不能像刚体那样可以移动作用点。因为力的作用点变更，对于可变形体来说，内力和变形就与原先的不

样了。因此，在研究地壳内的外力和内力时，力的作用点是不能随意变动的，也不可随意地把不在同一作用点的数个力合成一个力；反之也不能把一个力分解成不在原来作用点上的两个或数个力（潘立宙，1977）。

（二）力的类型

力的类型按不同原则有不同的分类。许多人按力的分布情况将力分为体力和面力。体力分布在物体的整个体积内，物体内所有各质点受到它的作用。如重力，它能够隔着一段距离起作用，其大小决定于作用物质的数量；面力是作用于介质表面并使介质相邻部分相互作用的力，如周围物质对一个颗粒或一个断块施加推力或拉力，面力的大小决定于作用的表面积。另一种力的分类是按力使物体移动方式来划分。按这原则分类，地壳中存在五种力：①张力，作用于岩石中同一条直线上且方向相反、大小相等的一对力。岩石抗张能力最弱，在张力作用下，岩石最易张裂而拉断。有些构造盆地、大陆裂谷具张裂性质；②压力，即作用于岩石中又在同一条直线上相向且大小相等的一对力。岩石的抗压强度较大，因此岩石随深度的增加围压增大，其强度亦随之增大。在压力作用下岩石中形成与压应力轴呈 $\leq 45^\circ$ 的剪裂隙，在层状岩石中易形成褶皱及逆冲断层；③剪力，即作用在岩石中一个平面两侧，且方向相反，大小相等的一对平行力。岩石的抗剪强度，约等于抗压强度的1/10，等于抗张强度的两倍。在地质构造中平推断层即由剪力作用形成；④弯力，它是由分布于岩石中一个平面的两侧，呈对称作用的两组力偶所组成，这种力是一种复合力。在自然界中常见到如岩层的弯曲，一些对称的背斜和向斜；⑤扭力，即作用在岩体中在一轴线上，两端相反的力偶作用所组成的力。在扭力作用时，由于二组力偶环绕扭轴作反向旋转而导致张力、压力、剪力及弯力分布在被扭曲地层和岩石中的不同部位（陈国达，1977）。

二、应 力

（一）应力的概念

当外力作用到岩石某部位，就引起岩石内部的内力，其单位面积上的内力就叫应力。

如果我们取一均匀连续的岩石中某一小块，围绕截面积 CD 上某一点 M 划取一块微面积 ΔA （图1-1）， ΔP 为作用在 ΔA 上的内力，那么这块面积上的平均内力：

$$P = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

就是平均应力。

如果把内力 ΔP 分解为垂直截面的法向分力 ΔN 及在截面平面内的切向分力 ΔT ，那么就可得到：

$$\sigma = \frac{\Delta N}{\Delta A} \quad \tau = \frac{\Delta T}{\Delta A}$$

这里 σ 为微面积 ΔA 上的正应力；而 τ 则为 ΔA 上的剪应力。如果为了消除面积大小的影响，将 ΔA 缩成无限小，则得：

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA}$$

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} = \frac{dN}{dA}$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA}$$

我们将 P 、 σ 及 τ 分别称为截面积 CD 上 M 点的全应力、正应力和剪应力。在岩石力学和构造地质学中往往把压应力以正号表示，张应力用负号表示。

为了分析地壳上一点的应力，可在此点取一个小立方体，测定其每个面上应力状况。为方便起见，可以使立方体的各棱分别与坐标系的三个轴平行。立方体各个单位面积上的力，都可分解为与三坐标轴平行的分力。作用在立方体六个面上应力分量共有 18 个（图 1-2）。假如立方体处于平衡状态，则剪应力 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ， $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ， $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ ，因此，在 9 个应力分量中，只有 6 个是独立的，所以一点的应力状态可以用这 6 个分量来表示， 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_{xz} 表示沿三个互相垂直的平面上的剪应力分量。

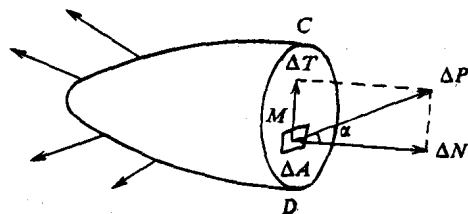


图 1-1 应力的概念

在均匀应力场中，三个剪应力为零的互相正交的面积称为主应力面，而它们的法线则称为主应力轴。垂直于主平面的正应力称为主应力。三个主应力互不相等则有最大主应力 (σ_1)、中间主应力 (σ_2) 和最小主应力 (σ_3) 之分，称为三维应力状态。当 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 时，称为二维（平面）应力状态；当只有 σ_1 ， $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 时，则为一维应力状态，由单轴压力或张力作用所产生。当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 时，则处在静水压力状态。在地球内，等于上覆岩石重量，如静岩压力效应。

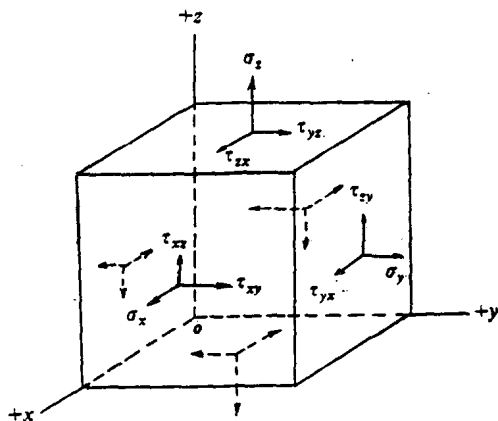


图 1-2 平衡状态下立方单元的应力
(据 Varnes, 1962)

(二) 单向外力作用下斜面上的应力

地壳中岩石在受单向拉伸和压缩时，斜面上不仅有垂直应力而且有切应力分布，如图 1-3 所示。如果岩石在垂直力 P 作用下在 AB 横切面 (F) 上，其应力 σ_0 的分布为：

$$\sigma_0 = \frac{P}{F} \quad (1)$$

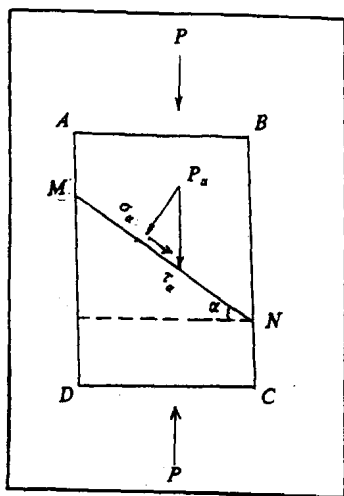


图 1-3 斜面上应力的分布

在岩石内部斜面 MN 上 F_x 其应力分布为:

$$P_x = \frac{P}{F_x}$$

$$P_x = \frac{F}{\cos \alpha}$$

$$P_x = \frac{P}{F} = \cos \alpha = \sigma_0 \cos \alpha \quad (2)$$

斜面上 F_x 的正应力 σ_x 与剪应力 τ_x 分别为:

$$\sigma_x = P_x \cos \alpha = \sigma_0 \cos^2 \alpha = \frac{\sigma_0}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (3)$$

$$\tau_x = P_x \sin \alpha = \sigma_0 \sin \alpha \cos \alpha = \frac{\sigma_0}{2} \sin 2\alpha \quad (4)$$

因为 $\cos 2\alpha$, $\sin 2\alpha$ 的数值在 +1 和 -1 之间波动, 随着 α 角的变化 σ_x 与 τ_x 的变化为:

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 即斜面与横切面平行, $\cos 2\alpha = 1$, $\sin 2\alpha = 0$, $\sigma_x = \sigma_0$, 即正应力为最大值, 等于轴向应力; $\tau_x = 0$.

当 $\alpha = 45^\circ$, $\cos 2\alpha = 0$, $\sin 2\alpha = 1$, 则 $\sigma_x = \sigma_0/2$, $\tau_x = \sigma_0/2$,

剪应力为最大值。

当 $\alpha = 90^\circ$, $\cos 2\alpha = -1$, $\sin 2\alpha = 0$, $\sigma_x = 0$, $\tau_x = 0$, 即斜面变为纵切面, 与单轴应力平行, 在其上正应力与剪应力均等于 0。

(三) 二向应力作用下斜截面上的应力

设在地壳岩石中某一点处于二向应力状态中如图 1-4 所示, 斜面 MN 与 σ_1 方向的横切面成 α 角; 与 σ_2 方向横切面成 β 角, 且 $\beta = 90^\circ - \alpha$, 在斜切面一点上正应力 σ_0 和 τ_0 可用应力叠加原理求得。

由公式 (3) (4) 得知, 当岩石单元体上, 只有 σ_1 时, 斜切面 MN 上的正应力 (σ_x) 与剪应力 (τ_x) 为:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (5)$$

$$\tau_x = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\alpha \quad (6)$$

同理, 当岩石单元体只有 σ_2 时, 斜切面 MN 上的正应力 σ_β 与剪应力 τ_β 为:

$$\sigma_\beta = \frac{\sigma_2}{2} (1 + \cos 2\beta) = \frac{\sigma_2}{2} [1 + \cos 2(90^\circ - \alpha)] = \frac{\sigma_2}{2} (1 - \cos 2\alpha) \quad (7)$$

$$\tau_\beta = \frac{\sigma_2}{2} \sin 2\beta = \frac{\sigma_2}{2} \sin 2(90^\circ - \alpha) = -\frac{\sigma_2}{2} \sin 2\alpha \quad (8)$$

把 σ_1 与 σ_2 所引起的斜截面上应力相叠加, 可得:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \sigma_x + \sigma_\beta = \frac{\sigma_1}{2} (1 + \cos 2\alpha) + \frac{\sigma_2}{2} (1 - \cos 2\alpha) \\ &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}\tau_o &= \tau_x + \tau_y = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\alpha - \frac{\sigma_2}{2} \sin 2\alpha \\ &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha\end{aligned}\quad (10)$$

因为 $\cos 2\alpha$ 的数值在 $+1$ 与 -1 之间, 同时 $\sigma_1 > \sigma_2$, 因此, 从式 (9) 中得知: 在 $\alpha=0^\circ$ 的截面上即垂直 σ_1 的横切面上

$$\sigma_{o \max} = \sigma_1$$

在 $\alpha=90^\circ$ 的截面上即垂直 σ_2 的横切面上

$$\sigma_{o \min} = \sigma_2$$

同理, 由公式 (10) 可知, $\sin 2\alpha = +1$, 有 $\alpha=45^\circ$ 的截面上为最大剪应力面。

$$\tau_{o \max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

(四) 应力莫尔圆求解应力

在二向应力状态中, 斜截面上的应力 σ_o 及 τ_o 都是 α 的函数。当 α 逐渐改变时, σ_o 及 τ_o 也随之变化。因而, 可将式 (9)、(10) 视为 α 的参数方程, 现将其消去, 就可得出一个应力圆的方程:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha$$

改写为:

$$\sigma_o - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\alpha$$

两边平方,

$$\left(\sigma_o - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \cos^2 2\alpha \quad (11)$$

将式 (10) 两边平方,

$$\tau_o^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \sin^2 2\alpha \quad (12)$$

将式 (11)、(12) 相加, 得

$$\left(\sigma_o - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)^2 + \tau_o^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \quad (13)$$

很显然, 式 (13) 是一个圆的方程, 在直角坐标中以横坐标表示 σ_o , 纵坐标表示 τ_o , 圆心坐标为 $(\sigma_1 + \sigma_2) / 2$, O 为圆的半径 (r) 为 $(\sigma_1 - \sigma_2) / 2$ 。这个圆是德国工程师莫尔提出的, 因此称为莫尔圆。其简单作法如下: 取横坐标为 σ , 纵坐标为 τ , 取 $OA = \sigma_1$, $OB = \sigma_2$, 得 AB 两点, 以 AB 为直径作圆即得应力莫尔圆。从图中可直接求出圆上任一点的 P 的正应力 (σ_o)、剪应力 (τ_o) 之值。

在三维应力状态中, 有 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, 亦能划出莫尔圆。如图 1-6 所示, 最大圆代表与 σ_1 、 σ_3 平面垂直的那些平面上的应力。中间圆及最小圆分别代表与 σ_1 、 σ_2 平面及 σ_2 、 σ_3 平面垂直的

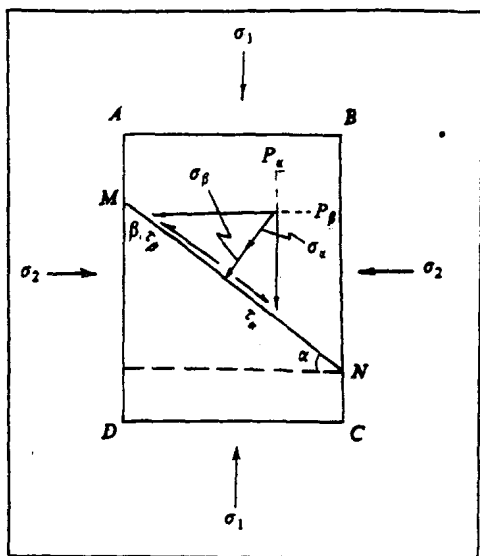


图 1-4 二向应力状态

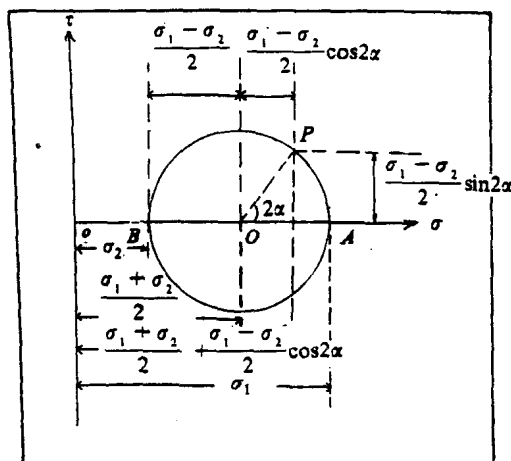


图 1-5 二维状态莫尔圆

那些平面上的应力。

莫尔圆的符号有各种规定。但在岩石力学中一般规定压应力为正，标在原点右边，拉应力为负，标在原点的左边。正的剪应力以一对左旋箭头标在圆的上方，负的剪应力以一对右旋箭头标在圆的下方。

(五) 应力的几种状态

(1) 单轴应力，其中有一个主应力不等于零，而另两个等于零。这又分两种情况：①单压缩中主应力为 σ_1 , $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, $\tau_{\max} = \sigma_1/2$ 莫尔圆在纵坐标右侧 (图 1-6-1a)；②在单轴拉伸中，主应力为 σ_3 , $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, $\tau_{\max} = \sigma_3/2$ ，莫尔圆在纵坐标左侧 (图 1-6-1b)。这两种情况在地壳浅部都是存在的。

(2) 双轴应力，其中有两个主应力不等于零，而另一主应力为零。这分 7 种情况：①双轴压缩，且 $\sigma_1 > \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$, $\tau_{\max} = \sigma_1/2$ ，莫尔圆在纵坐标右侧 (图 1-7)；②双轴压缩且 $\sigma_1 = \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$, $\tau_{\max} = \sigma_1/2$ ，莫尔圆变成在纵坐标右侧且与纵标相切 (图 1-6-2b)；③两轴拉伸，且 $\sigma_1 = 0$, $|\sigma_2| < |\sigma_3|$ ，则 $\tau_{\max} = \sigma_3/2$ ，莫尔圆在纵坐标左侧 (图 1-6-2c)。④两轴拉伸且 $|\sigma_2| = |\sigma_3|$, $\sigma_1 = 0$, $\tau = \sigma_3/2$ ，莫尔圆变成在纵坐标左侧且与其相切的圆。(图 1-6-2d)；⑤一轴压缩，一轴拉伸且 $|\sigma_1| = |\sigma_3|$, $\sigma_2 = 0$, $\tau_{\max} = \sigma_1/2$ ，莫尔圆通过纵坐标且偏右 (图 1-6-2e)；⑥一轴压缩，一轴拉伸 $|\sigma_1| < |\sigma_3|$, $\sigma_2 = 0$, $\tau_{\max} = |\sigma_3/2|$ ，莫尔圆通过纵坐标且偏左 (图 1-6-2f)；⑦一轴压缩，一轴拉伸且 $|\sigma_1| = |\sigma_3|$, $\sigma_2 = 0$ 。这是拉伸和压缩的特殊情况，这时最大剪应力作用的平面也是纯剪平面，该面上没有正应力，莫尔圆纵坐标为对称的两个圆 (图 1-6-2g)。这 7 种情况在地球中都是存在的。

(3) 三轴应力，分两种情况：①三轴压缩，即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，这是地球中普遍的应力状态，尤其是深部情况。 $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ，莫尔圆在纵坐标右侧 (图 1-6)；②三轴拉伸，在地壳中很少见，在实验室中，可出现。另外，三轴应力还有许多种情况，如一轴压缩两轴相等和不相等以及不相等的拉伸；一轴拉伸两轴相等和不相等的压缩等情况 (图 1-7—3a、3b、3c、3d)。

(4) 静水压力或静岩压力，是一种围压随深度均匀增大应力状态。在静水压力下所有平面上的应力都是压应力且 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P$ ，没有剪应力。(图 1-7) 这在地球深处是可能的。在真正的静水压力状态中，一点的平均应力是：

$$\sigma_{\text{平均}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{3\sigma_1}{3} = \sigma_1$$

$$\sigma_{\text{平均}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{3\sigma_1}{3} = \sigma_1$$

如果应力状态是非静水压力状态，但包含有静压组分，则其平均应力为：

$$\sigma_{\text{平均}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$