

中国地震局老专家科学基金
中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项

资助出版



工程岩体力学基本问题

安欧 著

地震出版社

中国地震局老专家科学基金 资助出版
中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项

工程岩体力学基本问题

安 欧 著

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程岩体力学基本问题/安欧著. —北京:地震出版社, 2012. 8
ISBN 978-7-5028-4115-7

I. ①工… II. ①安… III. ①工程力学—岩石力学 IV. ①TU45
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 179446 号

地震版 XM2759

工程岩体力学基本问题

安 欧 著

责任编辑: 王 伟

责任校对: 孔景宽

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业图书事业部: 68721991 68467982

E-mail: 68721991@sina.com

<http://www.dzpress.com.cn>

经销: 全国各地新华书店

印刷: 九州财鑫印刷有限公司

版(印)次: 2012年8月第一版 2012年8月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 250千字

印张: 9.75

印数: 0001~1000

书号: ISBN 978-7-5028-4115-7/TU (4792)

定价: 30.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

序 论

地壳力学在地震预测、石油开发和岩体工程中都有重要应用，并在这些学科领域中提出了一些新的概念和工作方法以及相应的理论。本书便含有如下的新特点：

(1) 提出工区岩体处于残余和现代两种应力场中，受此两种应力叠加场的作用和变形，详述了两种应力场的性质、异同、测量和叠加方法。

(2) 岩体在残余和现代应力叠加场中，产生在叠加应力作用下的综合力学性质，来对抗叠加应力场的动力作用，而不能再用只在现加载荷作用下固体力学惯用的普通力学性质，并据此建立岩体在叠加应力场中的综合力学方程。

(3) 工区岩体与区域岩体一样，都参与区域构造运动，受外围岩体的作用，不断变形、断裂、改变构造运动方式，论述了岩体运动方式变化的原因和最易活动的状态，据此提出了岩体工程须做与变化的运动方式相应的动态设计的要求。

(4) 岩体运动与地球自转有成因联系，随地球自转状态变化而不断改变运动方式，这是从地球自转状态变化趋势来预测工区岩体未来运动方式的基础，并可据此对工程做使用时段力学状态的预测性设计。

(5) 论述了地壳运动的时空分布规律：以水平运动为主、是不稳定变形、有全球统一性、空间分布呈等距性、时间上有继承性，并提出了它们各自的动力过程和成因。

(6) 论证了地壳应力场的特征：在成分组成上是叠加场、在物理性质上是梯度场、在受环境影响上是非独立场、在随时间变化上是非稳定场、在历史更替上是新旧并存场。

(7) 以地球自转力和公转力对地壳运动的主动作用为地壳构造运动的动力成因或地壳应力场的动力来源，作为前述诸章的理论依据和动力学基础。

上述七个方面，是地壳力学在工程岩体力学研究中进一步应用的概括，也是本书的七个学术特点。

望本书能反映工程岩体力学研究的重要进展，推动本学科研究的迅速发展。

安 欧

2011年9月于北京

目 录

第一章 地壳岩体内的应力场	(1)
第一节 岩体内应力场组成	(1)
第二节 岩体内应力场特征	(23)
第三节 岩体内应力的测量	(43)
第四节 岩体内应力场作用	(58)
第二章 工程岩体的力学性质	(66)
第一节 岩体综合力学性质	(66)
第二节 岩体综合力学方程	(79)
第三节 岩体中应力场分析	(87)
第三章 岩体的区域构造运动	(92)
第一节 岩体运动方式的变化	(92)
第二节 岩体最易活动的状态	(102)
第三节 围岩作用岩体的途径	(107)
第四章 岩体运动与地球自转	(110)
第一节 地块运动方式时段	(110)
第二节 地块运动方式预测	(119)
第五章 地壳运动的分布规律	(120)
第一节 地壳运动以水平运动为主	(120)
第二节 地壳运动属于不稳定变形	(122)
第三节 地壳运动具有全球统一性	(122)
第四节 地壳构造形象的分布等距	(124)
第五节 地壳运动有地史上继承性	(124)
第六节 地壳构造形象可互相叠加	(125)
第六章 地壳运动的动力来源	(126)
第一节 地球自转产生的地壳运动力	(126)
第二节 地球公转产生的地壳运动力	(130)
第七章 岩体工程设计新理念	(137)
第一节 岩体工程新的要素	(137)
第二节 岩体工程重要概念	(137)
第八章 岩体工程预期的问题	(143)
第一节 动力问题	(143)
第二节 岩性问题	(149)

第一章 地壳岩体内的应力场

本章，以地壳岩体在现代构造运动中存在残余和现代两种应力场作为运动动力；论述岩体内这两种应力场的物理性质、相异之处、共同特征、测量技术和叠加方法；为后面讨论岩体在两种应力场共同作用下产生的综合力学性质、工程动态设计和运动变化预测奠定双重的动力基础。考虑岩体受两种运动动力作用，而不是只受现代应力场一种动力作用，这是本书的第一个特点。

第一节 岩体内应力场组成

一、岩体残余应力场概论

地壳岩体内古应力场残留至今的残余场，简称残余应力场。残余应力场与现代成因造成的现代应力场同时存在于岩体中并共同叠加成地壳现代应力场，是现代地壳运动的动力。但二者除共同特征之外还有相异之处，因此须要分别论述和测量，而在应用时又要一起来使用。

1. 残余应力场力学性质

固体有边界载荷时内部产生的应力系统，在边界与外载平衡，为开放应力系统，如地壳惯性应力、重力应力。固体无边界载荷时内部存在的应力系统，在体内自行平衡，为封闭应力系统。其中，因固体内部因素变化产生的为内生应力系统，如玄武岩冷却应力；而由于开放应力在体内残留下来的为残余应力系统，如光弹性冻结模型应力。

1) 从岩石残余应力测件中所测得的是应力的标志

(1) 用 X 射线法测残余应力时，从岩石测件中所测的是矿物晶面间距的变化。间距缩短，相斥推压；间距拉长，互相引拉，反映的是晶面间法向弹性形变所受的压、张应力作用。

(2) 把残余应力测件的切片放在显微光弹仪上，观测到有矿物的光弹性等倾线和等色线。

(3) 垂直残余应力测件表面测到了法向泊松应变。因测件表面已是自由表面，现今法向应力已释放掉，故此法向应变应是表面方向残余应力作用引起的横向泊松应变。

(4) 残余应力测件中矿物残余应力引起 X 射线衍射线宽散，致高掠射角的 K_{α} 双线相连，使晶面间距 d 改变 Δd ，造成的衍射线峰值半高双向角宽化度为 $-\frac{\Delta d}{d} \tan \theta_0$ ，与所用 X 射线波长无关， θ_0 是矿物退火后无残余应力的掠射角。

(5) 测件中选侧矿物的 X 射线劳埃相上有星芒辐射状衍射斑点，退火后消失。

上述现象，是从岩石测件中测到的机械应力的固体物理学、光测弹性学、固体力学、X 射线物理学和 X 射线晶体学标志。

2) 从测件中所测的是古应力残余值的标志

(1) 测件是从地壳采下后测量，边界已无现今外力作用，其中的应力场在体内自行平衡，属残留自平衡应力系统。同一测件中，对不同种矿物晶粒测得的残余应力一致。

(2) 从测件中测得的应力值多大于同一测点的现今应力值，因而不会是现今应力的残余部分。

(3) 现今应力的地表铅直分量应为零。而测件中所测得残余应力场有地表铅直分量，可见并非现今应力的残余场。这是因含残余应力岩体的上部被剥蚀掉所致，是古应力残余场。

2. 残余应力场产生机制

岩体构造变形时，由于造岩矿物的强度不尽相同和分布方位差异，而使得它们并非同时都发生塑性变形，低强度高塑性的晶粒优先，而高强度高弹性的晶粒仍可处于弹性状态，便造成岩体内弹、塑性区共存的不均匀塑性变形状态，形成塑性区对弹性区的圈闭作用。先屈服者使用大塑性变形挤压流动并连接起来构成岩石塑性格架而成塑性基质，把尚处于弹性状态的晶粒包围起来造成其弹性局部封闭区，而使其中的应力保留下来，并作用于围岩而成局部平衡状态。由于基质的塑性变形并不恢复，即使外力卸去时局部封闭的弹性变形仍然保留，于是卸载后岩体内便存留自平衡应力（图 1.1）。此种应力便成为残余应力，可以是张性的、压性的、剪性的，有主方向。

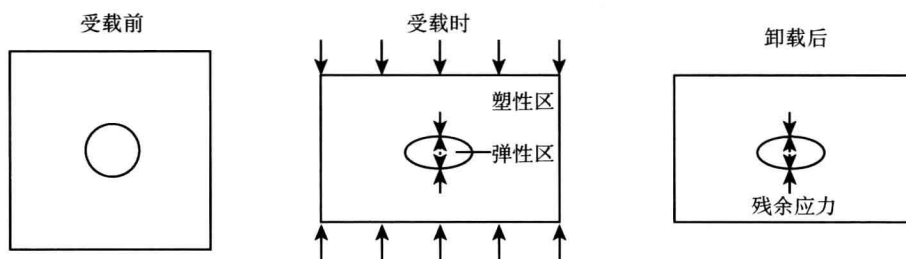


图 1.1 岩体中残余应力产生机制示意图

由此可知，一场构造应力作用，既造成一场岩体构造运动，又由于岩体力学结构的不均匀同时也产生不均匀塑性变形，而把其中的应力场以原分布形式保留下来一部分成为残余应力场。这种场与后来某时期的应力场叠加便构成该时期的地壳应力场，成为该时期地壳构造运动的动力。

下列事实也证实了此种残余应力产生机制：

1) 残余应力场方向与岩石组构记录的原场方向一致

一个地区岩石的后生组构，记录组构形成时应力场的分布方向，于是可用之求得形成时的古应力场方向。在红河断裂带测区的测量结果表明：地区残余应力的分布方向，与其形成时原应力场造成的岩石后生组构反映的受力方向一致。

为从地壳岩石后生组构来推求其形成时的受力方式，须对岩石做相当于地壳状态的压缩或拉伸实验，确定岩石在压缩或拉伸下所成后生组构的特点。岩石组构用 X 射线组构仪测定。

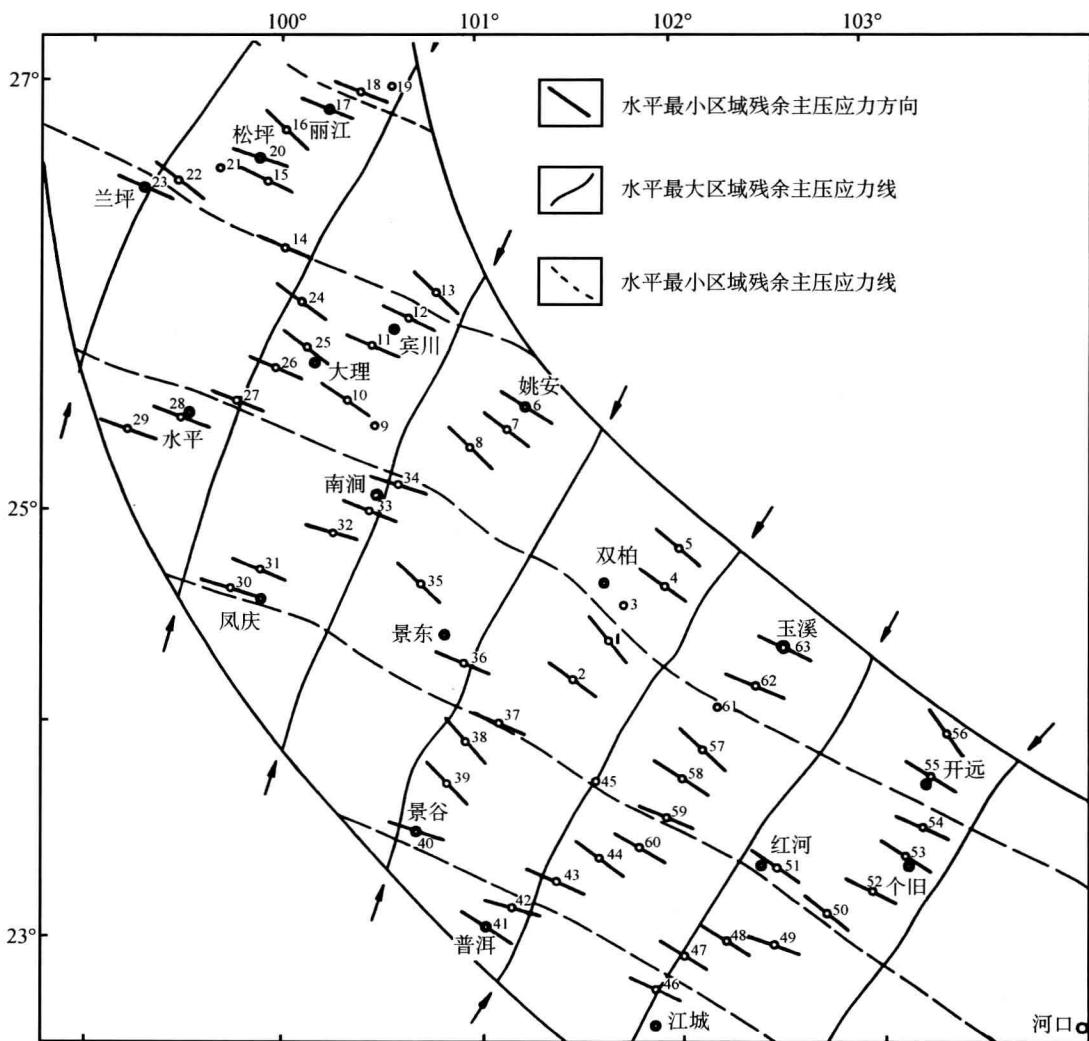


图 1.2 红河断裂带测区用 X 射线法测得的水平残余主应力线图 (高国宝参加测量)

实验结果表明: 岩石压缩变形后, 长柱状矿物晶粒长轴趋于转到与压缩方向垂直, 片状矿物晶粒的平面也趋于转到与压缩方向垂直。晶粒排列已有明显定向组构的岩石, 垂直其定向组构显示的压缩方向再次压缩, 则其新组构又显示与后一次压缩方位垂直, 说明岩石所保留下来的定向组构反映的是所经历的最后一场构造运动的受力方式。在测区网状布点采样, 可测得最后一场运动时各点的主应力方向和性质, 绘出此古应力场的主应力线分布图。

如, 红河断裂带测区, 水平最大残余主压应力线分布在 $N15^{\circ} \sim 45^{\circ}E$ 角域范围内 (图 1.2), 水平最大残余主压应力大小沿断裂带从 NW 向 SE 减弱 (图 1.3), 这与红河断裂带晚第三纪以来最近一场强烈构造运动的右旋压扭性错动和强度从 NW 向南东减弱是一致的。

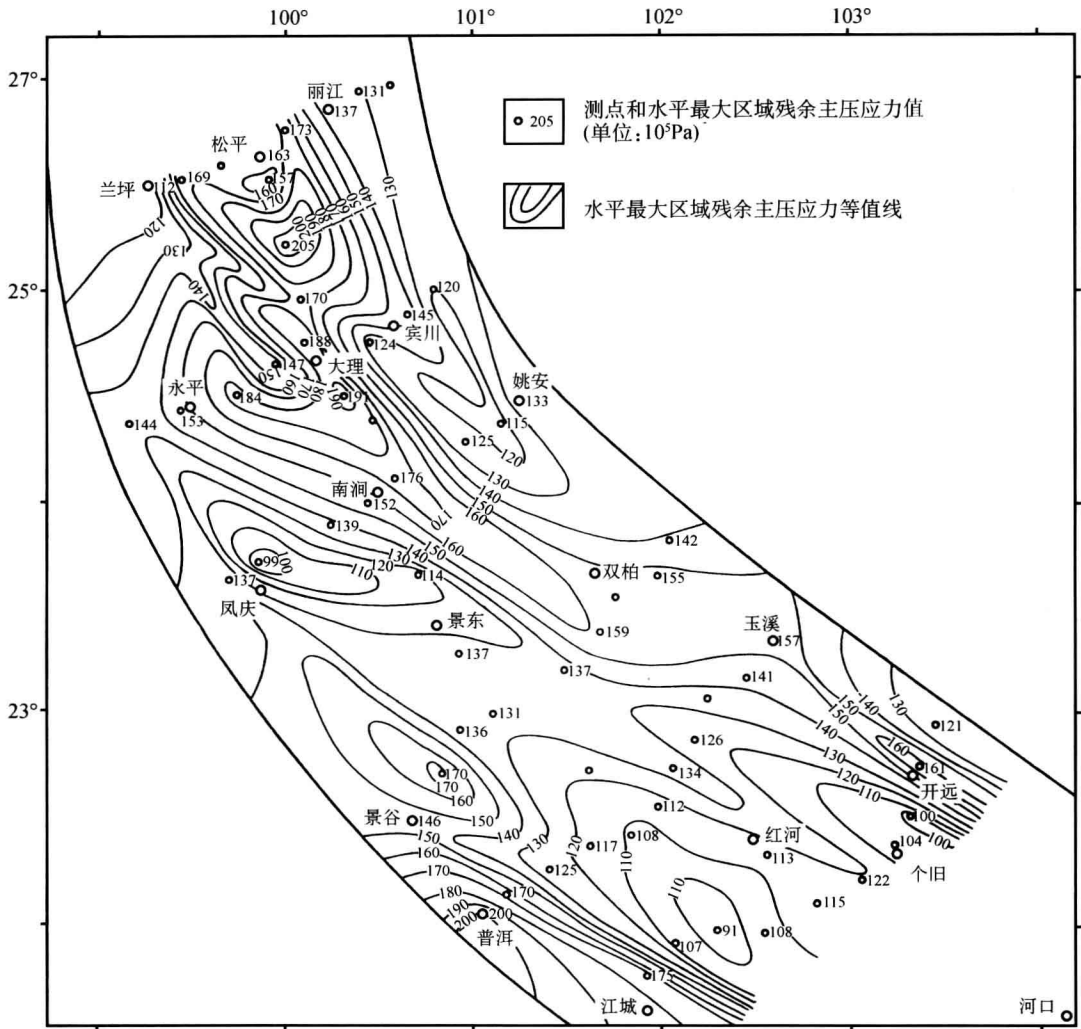


图 1.3 红河断裂带测区用 X 射线法测得的水平最大残余主应力水平等值线图 (高国宝参加测量)

2) 岩石结构不变其中的残余应力场便长期保留

在边长 20cm 正方形燧石灰岩板面上四个直角区内测得的板面方向残余主应力大小和方向与从每个小测区切下的直径 5cm 的圆板面上侧得的相同 (表 1.1)。在相距 100m 范围内的不同岩石中采样测得的残余应力结果相近 (表 1.2), 以致可在大小和方向上取其平均值, 而将此范围视为一个测点。这说明, 在上述尺度范围内, 只要岩石结构不被破坏或改变, 残余主应力的大小和方向基本不受测量岩块形状、尺寸和距离的影响, 虽经多次切割测量但仍不随之改变, 并可长期保留, 不因圆板从大岩板中切下或岩块从地壳采下后失去现今应力场作用在边界的载荷而消失。迁西地区荆子峪西北石英岩体中的 6 个测点, 于 1957 年测量后, 在 1965 年又重新采样复测, 所得水平残余主应力大小和方向, 除 6 号测点受采石破坏的影响外, 均未变化 (表 1.3)。此区侏罗纪前期的构造应力场和美国响尾蛇山区及日本关东地

区的白垩纪构造应力场，均能残留至今，也说明其松弛速度是极小的。这是由于受岩体中发生了强塑性变形骨架所控制的结果。而且，这种强塑性变形，是在地质时期内长期处于围岩的围压围限之下，而不能像四周都是自由表面那样随意改变。

表 1.1 在正方形 ABCD 燧石灰岩板四个直角区和从这四个直角区切下的圆板上测得的板面方向残余主应力大小和方向

直角测区	σ_1/MPa		σ_2/MPa		$\alpha/(\text{°})$	
	切圆板前	圆板上的	切圆板前	圆板上的	切圆板前	圆板上的
$\angle DAB$	11.0	11.0	7.5	7.4	28	28
$\angle ABC$	11.0	10.9	7.5	7.4	28	30
$\angle BCD$	11.0	11.0	7.5	7.5	29	28
$\angle CDA$	10.9	11.0	7.4	7.5	29	29

表 1.2 迁西地区 1—0 号测点在 100m 内的不同岩石中测得的水平残余主应力大小和方向

岩石	σ_1/MPa		σ_2/MPa		$\alpha/(\text{°})$	
	单测	平均	单测	平均	单测	平均
燧石灰岩	11.6		4.0		358	
石英岩	11.4	11.6	3.7	3.9	4	359
片麻岩	11.8		4.0		355	

表 1.3 迁西荆子峪西北石英岩中 NW 向测线的 6 个测点水平残余主应力大小和方向

岩石	σ_1/MPa		σ_2/MPa		$\alpha/(\text{°})$	
	1957 年测	1965 年测	1957 年测	1965 年测	1957 年测	1965 年测
1	13.5	13.5	5.1	5.2	60	62
2	13.6	13.6	5.1	4.9	90	91
3	13.3	13.4	5.0	5.0	85	85
4	12.5	12.5	4.8	4.8	80	80
5	12.3	12.4	4.0	4.1	80	80
6	11.2	10.5	4.5	3.6	75	70

3. 残余应力场物理特征

地壳岩体中的残余应力场，具有如下的特征：

(1) 残余应力场是岩体中的古应力场经漫长地质时期缓慢构造运动残留下来的残余场，在时空分布上不同程度地潜含有原应力场的特点，是原场的部分延续；现今应力场是造成地壳应力场的成因所直接引起的现今初生应力场，其时空分布受地壳应力场的成因直接控制，有初生的新特点，并与历史上残留下来的残余应力场进行叠加。

(2) 残余应力场是由岩体在构造运动中的不均匀塑性变形所造成, 受岩体强塑性的结构基质所控制, 构成自平衡应力系统; 现今应力场, 与边界条件随时相关, 并受控于边界条件。

(3) 残余应力场的方向与其原应力场的方向一致, 只要岩石结构不变便长期保留, 不因岩体失去边界载荷而消失, 岩体的强塑性变形形式不被改造则分布形态不变, 是稳定应力系统; 现今应力场, 随边界条件而变, 若岩体失去边界载荷便消失, 是不稳定应力系统。

(4) 残余应力场, 据其原生场的分布形态、岩体在构造运动过程中弹、塑性成分的程度比、弹、塑区大小比例、弹、塑性结构、相变特点、杂质含量及其分布有关, 是非独立场; 现今应力场, 也是非独立场。

综上可知, 残余应力场与现今应力场的相同点, 都是梯度场和非独立场; 不同点, 前者是残余场、封闭场、稳定场, 后者是原生场、开放场、非稳定场。

4. 残余应力场释放过程

1) 释放途径

岩体中封闭的一场残余应力, 不能自行上升, 但可下降, 称之为释放。岩体残余应力的释放, 有下列途径:

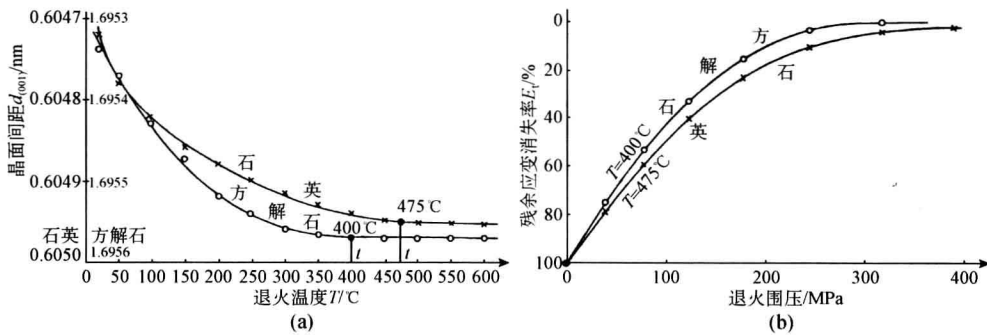


图 1.4 岩石中石英和方解石晶粒从岩石中取出在表面自由状态下退火后的 (001) 晶面系晶面间距 $d_{(001)}$ 随退火温度变化曲线 (a) 和在固定温度 t 退火后 $d_{(001)}$ 方向的残余应变消失率 E_r , 随退火时围压变化曲线 (b)

(1) 加热退火。

岩石中含残余应力矿物晶粒, 在表面自由状态时其晶面间距随退火温度而变化, 含压性残余应力者随退火温度升高而变大, 含张性残余应力者随退火温度升高而变小, 并各随退火温度的改变而趋向一无残余应力的恒定值 (图 1.4)。

退火方法: 先加热至退火温度, 保温几小时, 再缓冷至室温。中国西南部岩石中石英的退火温度为 475°C , 方解石的退火温度为 400°C , 所含残余应力便全部释放。

残余应力随高温退火而消失, 是由于强塑性变形矿物固结的结构格架或基质高温软化的结果, 残余应力也借助于热能的帮助而释放。

岩浆侵入、火山活动, 均可降低围岩中的残余应力。

(2) 发生破裂。

岩石破裂时，新裂面表层中平行裂面的残余应力保留，而垂直裂面的释放至一定深度。

圆柱形岩石试件在常温常围压下轴向压缩后，从平行压缩方向切出的平面测件中测得平行压缩方向的残余应力大小几乎没变，而在垂直压缩方向切出的平面测件中测得的垂直压缩方向的残余应力大小却显著减小（表 1.4）。切片观察发现，平行压缩方向出现许多张裂隙，说明岩石经塑性形变后，垂直新裂面方向的残余应力减小，而平行新裂面方向的则几乎不变。表 1.5 中的实测结果也表明：在正方形燧石灰岩板面上，平行板边与其有不同距离的 20mm × 2mm 的矩形小测区，用 X 射线测得板面方向的残余应力中，平行板边方向的从板边向里都不变，而垂直板边方向的则从板内向板边减小到零。垂直板边侧面的残余应力释放深度约为 1.0 ~ 1.5cm。此释放深度，是岩石性质、岩块形状和尺度、表面平整度和残余应力量级的函数。

岩体破裂对垂直新裂面方向残余应力的释放，是大地震改变残余应力场的一个重要途径，但属量值的部分释放，并不改变残余应力场的主方向。

(3) 机械振动。

岩体中振动的交变应力引起的往返变形，可造成应力松弛，减弱残余应力。一个地区发生大地震后，会使残余应力场减弱。但减量有限，而不可能全部释放。

(4) 塑性变形。

表 1.4 定向岩样在常温常围压下短时沿铅直单轴压缩后铅直轴向和东西横向残余应力的变化

岩石	转向压力 (MPa)	加载时间 (min)	铅直轴向残余应力/MPa		东西横向残余应力/MPa	
			压缩前	压缩后	压缩前	压缩后
石英岩	70.5	1.2	20.1	19.9	19.8	7.0
石灰岩	68.0	1.0	18.3	18.3	16.4	6.1
片麻岩	51.2	1.3	16.0	15.9	15.0	4.8

表 1.5 正方形燧石灰岩板上板面方向的残余应力向板内的变化深度

长条矩形测区与板边距离/mm	平行板边方向的残余应力/MPa	垂直板边方向的残余应力/MPa
1	11.0	0
5	11.0	3.0
10	10.9	7.1
15	10.9	7.5
20	11.0	7.4
25	11.0	7.5
30	11.0	7.5

岩体的塑性变形改变其中弹性状态晶粒的边界条件，而使其中的残余应力也发生改变。

压缩使含残余应力晶粒中的拉应力减弱，拉伸使含残余应力晶粒中的压应力减弱，剪切使含残余应力晶粒中的反向剪应力减弱。这种塑性变形，使残余应力场减弱一些又增加一些，而做重新分布。在强塑性变形的蠕变中，则把残余应力场调整向其变形应力场的分布状态转变，以至完全转变成后者。因此，一个地区的残余应力场，反映的是该区最后一场强烈构造运动的变形形式和应力状态。

综上所述，残余应力是在岩体长期构造变形中，尚处于弹性变形阶段的高弹性矿物被周围变形的强塑性矿物所固结，同时引起其间的相互作用，而使其中的应力得以残留下来。在形成机制上，属岩体塑性固结应力系统。因而，取消边界外力时，以自平衡状态存在于岩体内，而成为残留自平衡应力系统；方向与岩体强塑性形变场的相应主方向一致，只要岩石结构不变便在其中长期保留；一旦经过高温退火、岩体破裂、发生振动或塑性变形，便发生改变，重新分布，甚或完全转变成最后一场强烈构造运动应力场的分布形态，而成为它的残余应力场。

2) 释放速度

只要测得岩体破裂时的抗断强度 σ_c 及残留至今的残余应力值 σ_r ，可得残余差应力 $\Delta\sigma_i = \sigma_c - \sigma_r$ ，再测得岩体破裂至今所经过的时间 Δt ，便可求得该场残余应力在这段历史过程中的释放速度

$$v = \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta t}$$

二、岩体现代应力场概论

地壳中现代成因造成的应力场，为现代应力场。它与岩体中古应力场残留至今的残余场叠加成地壳现代应力场，推动现代地壳运动。

1. 现代应力场成因

1) 地球自转动力作用

(1) 地球自转快慢交替变更的机制。

地球作为一个天体，从形成时起就在自转着，其自转角速度的快慢主要受控于其质量分布。

质点组绕质心的自转轴的转动动能为

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1.1)$$

式中， I 是质点组的轴惯性矩，其值越大储能越多； ω 是质点组角速度。据质点组转动动能定理，质点组从自转状态 1 转动到 2 时，转动动能的改变量

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2}I(\omega_2^2 - \omega_1^2) = D \cdot \theta$$

式中, D 为质点组对自转轴的力矩和; θ 为转角。此式说明: 质点组转动动能增加, 力矩做功为正, 方向与转动同向; 质点组转动动能减小, 力矩做功为负, 方向与转动反向。因为地球从形成时起, 就在其转动动能支配下自转, 故转动动能的改变是主动变化量。据质点组动量矩定理,

$$I(\omega_2 - \omega_1) = \int_{t_1}^{t_2} D dt \quad (1.2)$$

式中, $I\omega$ 是质点组动量矩, 表示质点组绕轴转动的强弱程度。取角加速度 ε , 得

$$I\varepsilon = D \quad (1.2')$$

式 (1.2) 说明: ①质点组转动时动量矩随时间改变; ②质点组动量矩的改变由力矩和引起; ③力矩和为零, 则角加速度为零, 质点组做匀速自转; ④在同样角加速度下, 惯性矩 I 大的质点其和力矩也大, 惯性矩小的质点其和力矩也小。说明, 惯性矩表示质点组转动惯性的强弱, 是质点组转动惯性的量度, 又称转动惯量。

若外力过质点组质心, 由于此时对过质心转轴的力矩和为零, 则式 (1.2') 右边为零, 使质点组对过质心转轴的动量矩不变, 即

$$I\omega = \text{恒量}$$

这表明: 当质量分布距转轴远时, I 变大, 则 ω 变小; 当质量分布距转轴近时, I 变小, 则 ω 变大。因之, 当地球自转加快时, 惯性离心力随之增大, 使地球扁率变大, 高密度岩浆从深部外溢, I 随之增大。但此种后果又使地球自转速率减小, 于是惯性离心力也减小, 扁率又变小, 且在重力分异作用下使重物质下沉, I 随之减小。但由上式知, 这又使 ω 增大, 如此自动控制自转速度, 时快时慢地变化。它受控于地球内部质量分布的改变, 由自行主动调节 I 的大小来实现。

(2) 地球自转惯性矩和动能的分布。

质量为 M , 半径为 R 的圆球壳, 对过中心任一轴的惯性矩

$$I = \frac{2}{3}MR^2$$

质量为 M , 半径为 R 的圆球壳, 对任一径向轴的惯性矩

$$I = \frac{2}{5}MR^2$$

地核质量 $M_{核}$ 为 188×10^{22} kg, 半径 $R_{核}$ 为 3571 km; 地幔质量 $M_{幔}$ 为 405×10^{22} kg, 内、

外半径为 3571km、6336km，质量集中壳半径 $R_{\text{幔}}$ 为 5310km；地壳质量 $M_{\text{壳}}$ 为 5×10^{22} kg，内、外半径为 6336km、6371km，质量集中壳半径 $R_{\text{壳}}$ 为 6353km。则得地核、地幔、地壳对地球自转轴的惯性矩并代入式 (1.1) 求得三者的自转动能，列于表 (1.6)。

表 1.6 地核、地幔、地壳对地球自转轴的惯性矩和自转动能

轴 惯 性 矩		自 转 动 能	
表示式	计算值/ ($\text{kg} \cdot \text{km}^2$)	表示式	计算值/ ($\omega^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{km}^2$)
$I_{\text{核}} = \frac{2}{5} M_{\text{核}} \cdot R_{\text{核}}^2$	9590×10^{27}	$E_{\text{核}} = \frac{1}{2} I_{\text{核}} \cdot \omega^2$	4795×10^{27}
$I_{\text{幔}} = \frac{2}{3} M_{\text{幔}} \cdot R_{\text{幔}}^2$	7613×10^{28}	$E_{\text{幔}} = \frac{1}{2} I_{\text{幔}} \cdot \omega^2$	3807×10^{28}
$I_{\text{壳}} = \frac{2}{3} M_{\text{壳}} \cdot R_{\text{壳}}^2$	1345×10^{27}	$E_{\text{壳}} = \frac{1}{2} I_{\text{壳}} \cdot \omega^2$	673×10^{27}

此结果说明：

①地核、地幔、地壳惯性矩大小的顺序是 $I_{\text{幔}} > I_{\text{核}} > I_{\text{壳}}$ ，惯性矩最大者是地幔，地壳最小；

②地球的自转惯性主要由深部控制，深部自转加快则全都随之加快，深部自转减慢则全都随之减慢；

③地球自转动能大小的顺序，也是 $E_{\text{幔}} > E_{\text{核}} > E_{\text{壳}}$ ，由式 (1.2) 和式 (1.2') 知，其动量矩及力矩和，也是地幔的大于地核，地核的大于地壳，其各自的变化量也是如此。

综而言之，地球自转中能动性最大的部分是地幔，对地壳来说是来自下部被低强度层与其分开的高密度高质量部分；地壳和地核都受控于地幔的主动转动作用而随之一起转动，并由于惯性滞后而有相对的反作用，形成相互间兼有扭性的压、张力；这种高质量体之间的作用，无论表述为能量还是力，都是巨大的；对地壳，所受这种来自其下部的主动转动作用，主要表现在水平东西方向，大小等于壳中地块的惯性力，地球自转加速时与地球自转同向而自西向东，地球自转减速时因负加速度与地球自转反向而自东向西，即此种主动转动作用与壳中地块的惯性力等值反向。

(3) 地球自转引起的各主要质量力。

地球绕自转轴以角速度 ω 匀速自转时，地壳中质量为 m 的块体上作用有两种质量力，一是方向指向地心的地心引力

$$Q = k \frac{Mm}{r^2} \quad (1.3)$$

式中， k 为引力常数； M 为地球质量； r 为块体与地心距离；此处的 m 是引力质量； Q 力随 m 增加而增大，随深度增加因 r 减小也增大。二是方向垂直地球自转轴的惯性离心力 (图 1.5)

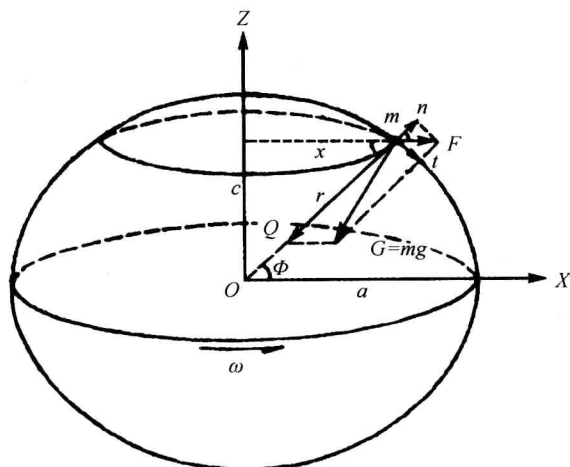


图 1.5 地球自转中地心引力和惯性离心力的关系

$$F = ma_n = mx\omega^2 = m\omega^2 r \cos\phi \quad (1.4)$$

式中， a_n 为离心加速度； x 为块体与地球自转轴距离； ϕ 为块体地理纬度；此处的 m 是惯性质量； F 在径向的分力

$$n = F \cos\phi = m\omega^2 r \cos^2\phi \quad (1.5)$$

F 指向赤道的经向水平分力

$$t = F \sin\phi = m\omega^2 r \sin\phi \cos\phi \quad (1.6)$$

Q 与 F 的向量和为块体重力 $G = mg$ ，随 Q 和 F 的大小而变， g 为块体所在纬度的重力加速度。可见，块体的 m 增大，则 t 线性增大； r 增大， t 也线性增大。 t 与 ω^2 成正比，只要地球自转着这个力就存在，不论地球加速或减速自转， t 的方向总是从两极指向赤道。

地球变速自转中，地壳中质量为 m 的块体由于受控于来自地幔的加速或减速纬向主动转动作用力 τ 的作用，还产生一指向地球自转方向的纬向切线加速度 a_τ ，因之还有一与 τ 等值反向的纬向水平惯性力 ma_τ ，并有

$$\tau = ma_\tau = mx\varepsilon = m\varepsilon r \cos\phi \quad (1.7)$$

式中， ε 为地球自转角加速度。可见，块体的 m 增大，则 τ 线性增大； r 增大，则 τ 亦线性增大。

综上所述，地壳块体上所受的作用力，有地心引力 Q 、与引力反向的自转径向惯性力 n 和经向水平力 t 以及来自地幔的纬向水平力 τ 。径向 Q 和 n 的作用反向，故径向质量力的合力为 $(Q - n)$ ，由于 n 随深度增加线性减小， Q 随深度增加成二次方增大，则此合力随深度

增加而增大，它是铅直力的主要力源；水平方向有经向指向赤道的 t 和纬向以指向地球自转方向为正的 τ ，此二水平方向质量力的大小随 m 、 ω 、 ε 的增加而增大，随深度增加而减小。地球变速自转时，地幔纬向主动转动力 τ 的方向，加速时自西向东，减速时自东向西。 t 和 τ 是水平力的主要力源。

根据上述，地壳水平应力主要产生于地球自转中的惯性作用，故也称惯性应力；地壳铅直应力主要产生于地球自转中的重力作用，故也称重力应力。

惯性应力场是由地球自转引起的地块惯性作用产生的南北向水平力 t 和变速自转引起的地块东西向水平力 τ 造成的。 t 在质量不同地块的南北边界产生相互作用的边界力 F_t ，并在所论地块中引起南北向体积力 $f_t = \rho\omega^2 r \sin\phi \cos\phi$ 。 τ 在洋陆地块边界产生相互作用的東西向边界力 F_τ ，并在所论地块中引起东西向体积力 $f_\tau = \rho\varepsilon r \cos\phi$ 。地球自转加速时， F_t 的方向从两极指向赤道， F_τ 的主动方向和 f_τ 的方向向东；地球自转减速时， F_t 的方向仍是从两极指向赤道，因为减速引起的 F_t 增量的绝对值 $|\Delta F_t| < F_t$ ， F_τ 的主动方向和 f_τ 的方向向西。因而在地球自转匀速时， $\varepsilon = 0$ ，则 $F_\tau = f_\tau = 0$ ，只有由两极向赤道的水平力 F_t 和 f_t 作用；地球自转加速时， F_t 和 f_t 与自西向东的 F_τ 的和 f_τ 之合力方向，在北半球分布在北西角域内，在南半球分布在南西角域内；地球自转减速时， F_t 和 f_t 与自东向西的 F_τ 的和 f_τ 之合力方向，在北半球分布在北东角域内，在南半球分布在南东角域内；由于 F_t 的方向不变，只有 F_τ 改变方向，并且地球自转角速度自古生代以来长趋势减速（图 1.6），在总的减速大趋势下叠加有局部短时间的加速和匀速的小波动（图 1.7），故大趋势是东西向压缩，时而短时段以南北向压缩为主，且东西向作用力大于南北向作用力，因之当地球自转的一种变速趋势的时间长了之后，由于地块间传力机制的充分调整，会逐渐使得 F_t 与 F_τ 的合力方向转向以 F_τ 为主的方向。图 1.8 所示全球大震震源机制解 P 轴方向的分布与地球自转变化趋势的关系，证明了这一点。实验证明，P 轴方向的误差为 $-25^\circ \sim 40^\circ$ 左右，故取统计优势方向是有意义的。P 轴反映的是震源深度的应力状态，是震源体中的平均主压应力方位。

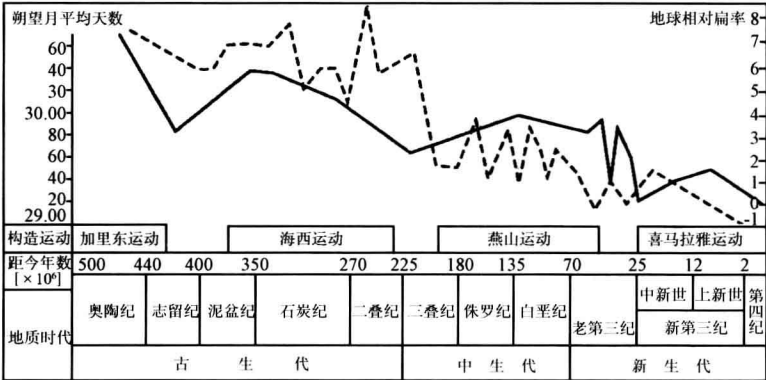


图 1.6 地球自转角速度随时间变化与构造运动规律的关系
(曾秋生, 1977, 左坐标, 实线; 戴米尔, 1952, 右坐标, 虚线)

2) 重力应力场的产生

地块中上覆岩体重力在各深度处产生的应力场，为重力应力场。