

〔美〕 N.L.卡特等编

地壳岩石的 力学性状



地震出版社



地壳岩石的力学性状

〔美〕 N.L. 卡特 等 编

何永年 施良骐 等 译

马 瑾 等 校

地 震 出 版 社

1989

内 容 提 要

本书是从美国岩石力学专家 J. W. 韩丁纪念集中选译而成的。全书共选译16篇, 编译1篇。内容涉及美国构造物理学和岩石变形机制及其应用评价, 影响岩石变形诸因素的最新研究成果, 地壳应力场研究, 断层带与现场岩石力学的研究, 岩石变形的微观研究等。

参加本书翻译的人员有: 何永年, 施良骥, 王宝生, 王绳祖, 郭才华, 史兰斌, 林传勇。

本书可供地震、地质和工程建筑的专业人员以及有关大专院校师生参考。

Mechanical Behavior of Crustal Rocks

(The Handin Volum)

N. L. Carter M. Friedman
J. M. Logan D. W. Stearns editors

by American Geophysical Union 1981

地壳岩石的力学性状

[美] N. L. 卡特 等 编

何永年 施良骥 等 译

马 瑾 等 校

责任编辑: 李树菁

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路68号

北 京 印 刷 二 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 12.75印张 326千字

1989年2月第一版 1989年2月第一次印刷

印数 0001—1300

ISBN 7-5028-0067-0/P·45

(473) 定价: 5.85元



序

《地壳岩石的力学性状》译文集共有论文17篇，其中16篇均选自英文《韩丁纪念专辑》。

其中有两篇论文讨论了实验构造物理学的内容和研究历史。在美国，构造物理学是在解决石油开采问题中发展起来的，因此，它不仅在理论上具有重要意义，在生产建设上也发挥着重要作用。

有4篇论文讨论应力、应变现场测量技术和地壳应力状态。目前测量地下现场应力的方法有测量深部绝对应力的水压致裂法和浅层的套芯法。前者花费高，故测量数据较少；后者比较便宜，但受浅层干扰大。在圣安德烈斯断层附近地下3米处用套芯法进行了24个绝对应力测量。与水压致裂法的结果比较，发现二者得到的应力方向是一致的，但浅部套芯法得到的应力值低得多。在常规三轴实验中，取 $\sigma_2 = \sigma_3$ ，在许多模拟计算的模型中假设介质是各向同性的。这里有几篇文章则强调考虑介质各向异性和应力各向异性的重要性。关于残余应力的影响大小，十几年来一直是个有争议的问题。有人认为残余应力可以影响岩石的力学性状和现场构造应力及重力的测量结果，有人则持否定态度。残余应力是作用在岩块中的一组应力，在没有外力和温度梯度作用的情况下，这组力是内部平衡的。当残余应力的量级和方向在比组成岩石的矿物颗粒大得多的岩块内一致时，称为宏观残余应力；当它们仅在颗粒尺度上一致时，则称为微观残余应力。

本书还有几篇译文详细讨论了结晶岩石中微观残余应力的成因及其对现场应力测量的影响。此外，还有几篇译文详细讨论了地壳中偏应力很低的问题，并对美国东部和中部地震矩比西部大2—3个数量级的原因进行了解释。

地壳中应变集中于断层带，而断层带往往含有由断层运动造成的岩石碎屑及后期水热、风化作用的产物。这些断层物质统称为断层泥，实际上它既包括了粘土型断层泥（狭义的断层泥），也包括了非粘土型断层物质。最近有人得出沿圣安德烈斯断层带有一个低速、低密度带，这个带可以延伸到地下15公里的深处。波速低、密度小可能与断层带孔隙度大、水的存在及水热交代作用、溶解作用和液体的搬运作用有关。因此，断层附近这种带的存在使人们注意研究断层物质的力学性质以及断层泥带的本构关系。这些断层物质既包括了人工配置的模拟断层泥，也包括了深部钻孔中采集的天然断层泥。在研究断层物质力学性状的同时，人们也注意了可控条件下剪切带的微观组构的分析，这对野外断层带的结构分析无疑是一个重要的补充。与此同时，本书还有几篇论文研究了模拟断层带中孔隙体积的变化。

在实验室干燥条件下石英是一种很强硬的不易变形的矿物，而在自然界中石英却极易变形。这里水解弱化起了重要作用。对水解弱化作用的研究正在从各方面深入。例如在各种温度压力条件下研究羟基含量不同的合成石英的屈服强度与晶体内部气泡中水的沉淀和溶解的关系、水解弱化了合成石英晶体在流变学上的各向异性等。

此外，本文集中还收集了一些讨论压机刚度对变形稳定性的影响、蠕变破裂等方面的论文。这些问题都是目前实验构造物理学研究中一些令人瞩目的问题。

实验构造物理学是在可控条件下进行实验研究，它对理解地质过程是有积极作用的。尽管实验工作者在使实验逼近自然界的客观条件方面进行了许多努力，但是，使实验更符合自然界的条件仍是一个努力方向。

马 瑾

1987年9月

目 录

地壳岩石变形力学发展史.....	(1)
对浅地壳中断裂作用的认识——选择实验和理论研究的作用.....	(8)
结晶岩类中测量的残余应变的起因.....	(23)
花岗质岩石的蠕变和蠕变破裂.....	(32)
含模拟断层泥的断层本构特性.....	(51)
模拟断层摩擦滑动时的孔隙体积变化.....	(71)
圣安德烈斯断层带干湖谷一号井天然断层泥的实验室研究.....	(82)
石英变形过程中水的作用的实验研究.....	(93)
刚性试验机、粘滑及岩石变形的稳定性.....	(106)
圣安德烈斯断层附近浅层岩芯套钻法应力测量.....	(115)
岩石圈中低的偏应力情况.....	(129)
水解弱化合成石英晶体流变学的各向异性.....	(142)
关于在实验室内近似模拟地下(埋藏的)应力状态的讨论.....	(162)
对实验室岩石试验的评价.....	(171)
实验产生的剪切带中的方解石组构.....	(175)
中国的大地构造——大陆规模的碎裂流动.....	(189)
实验构造物理学.....	(195)

地壳岩石变形力学发展史

M. K. Hubbert

开展岩石变形力学的基础研究和解决构造物理学与构造地质学方面的问题涉及到构造地质学中以下三个独立的方面：（1）在各种应力条件下岩石行为的力学理论；（2）在地下10几公里深处的应力和温度条件下岩石实验和岩组学研究；（3）根据理论和实验结果来解释野外地质构造。

M. A. Biot 是19世纪40年代岩石变形力学研究的参加者之一。在以后的20年内，Biot 撰写了一系列文章，例如在充满液体的多孔沉积岩中弹性波的传播、盐丘形成初期层状盐岩的褶皱和非稳定性力学，以及岩石变形不可逆过程热力学理论的发展等。但是，直到十九世纪五十年代末，当 D. Griggs 的助手 J. Handin 参与实验工作时，这项研究才算正式开始。同时，荷兰地质学家 Helmer Ode，在离开莱登大学前不久被分配来从事该项研究中的理论工作。此后立刻开始了高围压和高温下岩石变形设备的设计和制造。

在本世纪二十年代之前，经过一个多世纪对地球大部分大陆地区的野外填图工作，人们对构造地质学的观察现象已相当熟悉。这些现象主要包括变形和变质岩石的形态分布以及对伴生变形的运动学解释。一些地质构造涉及变形体的复杂力学原理，而构造地质学家大多又缺乏这一类力学知识，所以就造成了在认识这些构造方面的弱点。

实际上变形体的基本力学理论，即弹性理论，流体力学理论，无限小应变和有限应变理论，在17和18世纪已得到发展。早在1773年，法国科学家 C. A. Coulomb 就开始对施加应力时固体产生断裂的破坏情况进行过研究，并在同年的一篇文章中进行了介绍（此文到1776年才出版）。Coulomb 还建立了滑动摩擦定律。他认为，在固体中产生破坏与滑动所需的剪切应力由两部分组成：一部分为该固体固有的剪切强度，另一部分同作用于潜在破裂面上的应力垂直分量成正比。库伦破坏定律可以用如下方程表示：

$$\tau_{\text{破坏}} = \tau_0 + \mu \sigma \quad (1)$$

其中 $\tau_{\text{破坏}}$ 是产生断裂所需的剪切应力； τ_0 是材料的剪切强度； σ 是正应力分量； μ 是材料的无量纲常数。其后发现岩石与松散土壤的 μ 值大约为0.6。

在1820—1830这十年内，弹性理论由法国数学家 Navier, Cauchy 和 Poisson 确立。他们作出的基本结果之一是，在一连续物体内部给定的任一点的应力状态可以由作用于三个互相垂直的平面上的3个正应力分量和6个剪应力分量来确定。这三个面要通过给定点并且平行于它们各自的交线。这9个分量，其中只有6个是独立的，由这个应力分量可以确定同参考面法线成任意交角的面上的应力。特别是证明了通过每一点都有一组互相垂直的面，在这样的每个面上剪应力都变为0，应力减少成三个主正应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 。

19世纪晚期，卓越的构造地质学家之一、威斯康星州大学和美国地质调查所的 C. R. V.

Hise 在北部大湖地区多年研究紧闭皱褶的前寒武纪沉积岩。1896年, V. Hise 出版了一篇重要的专论, 其中描述了这一地区的构造地质现象并进行了适当的讨论。

在这篇论文出版的同时, V. Hise 有个搞工程的同事 L. M. Hoskins 写了另一姐妹篇。在此文中他概述了固体中应力状态的主要特性及有限应变理论的要点。他还概述了 Coulomb 原理, 固体中的断裂角受材料强度及作用于断裂面的正应力大小的影响。他证明了在压力作用下均匀固体的剪切破裂应沿一组相交的面出现, 这组面所夹的锐角被最大压应力主轴所平分。而后他引用了31个铸铁圆柱破裂实验资料, 实验结果是, 破裂面与最大压应力轴之间的角度平均为 35° 。

如果这些原理适合压力作用的岩石, 那么可以预期, 由剪切产生的断裂应沿与最大和最小压应力轴斜交的面出现, 但是(若材料是均匀的)同最大压应力轴所成的角小于 45° 。在这种情况下, 可能发育两个相交的断裂面, 以一定角度相互切穿, 最大压力平分其锐角。

V. Hise 的同事 Hoskins 作了一个等边的平行四边形木框架, 把每个角都绞接起来。在这一框架上置一金属丝网屏, 使金属丝平行于框的边, 在中心铆上一个圆的硬纸盘, 在框架处于未变形的矩形位置时, 在屏上画一圆周和两条相交的直径, 并分别平行于金属网。

当沿一条对角线挤压框架时, 沿此对角线缩短, 沿另一对角线伸长。圆纸盘仍作为参考, 但画在网上的圆圈则变形而成为应变椭圆, 所画的平行于金属丝的直径, 从互相垂直转变到成锐角与钝角相交。钝角被缩短轴平分, 锐角被伸长轴平分。可以假定这些线代表了岩石中可能出现破裂的面。因此, 根据这一模型, 一组共轭破裂的钝角应被缩短轴和最大压应力轴所平分, 这与 Hoskins 所清楚论述的及实验证明的结果相反。

这一金属丝模型的另一用途是用以论证旋转应力与应变。把矩形模型竖直放在一张桌子上, 模型的顶边可沿桌面平移。在这种情形下金属丝屏上的应变椭球体的长轴平行于此框架的长对角线, 同时相对于桌面发生旋转, 即旋转应变, 不过这是假定由旋转应力, 即围绕垂直于框架平面的轴作用的一对不平衡力偶引起的。还不能辨认由于这样的力矩作用引起框架以一定的角加速度旋转。因为这种旋转没有出现, 所以总力矩必定是零, 所假定的旋转应力就是臆想的。

至于断裂作用, 本世纪20年代人们早已分辨出四类断层: 正断层、逆断层、沿垂直面具有水平剪切分量的平移断层和逆冲断层。逆断层、逆冲断层和平移断层显然是同压应力有关的, 不过位移达15公里以上的逆冲断层在力学上还是个谜。正断层在垂直断面走向的水平方向上有拉长, 所以一般也解释为由张应力引起的, 因此多指“张断层”。

由后一种观点得出的一种有趣的推论是对沿得克萨斯和路易斯安那海湾第三纪巨厚沉积物剖面中的断裂作用的解释。本世纪20年代早期, 已知这些沉积岩的构造是盐丘, 并已发现有很大的油田同盐丘伴生。1926年一位地质学家在芝加哥大学讲授油田地质课时, 学生们问他在海湾沉积岩中是否也有断裂作用, 他问答是, 既然逆断层是由压应力造成的, 那么压应力也应产生褶皱, 因为在这些沉积物中不存在褶皱作用, 所以不能预期会有逆断层或逆冲断层存在; 另一方面, 正断层是由张应力造成的, 但第三纪沉积物是由疏松的砂和粘土组成的, 它们没有抗张强度, 所以不能形成正断层。这样, 除了圆形的盐丘, 不能期望会在海湾第三纪沉积物中有断裂作用。

现在已经知道, 这些沉积物被众多的走向主要是平行于海岸线与沉积物走向的正断层所切割。不过壳牌公司的一位老一辈的地质学家曾告诉过我, 直到30年代, 电测井记录最终提

供了这种断层确实存在的无可争议的证据之后,才放弃了上述的教条主义观点。事实上,某个地质学家轻率地在地图上画上一条断层,而他离开这个地区之后,就要指定另一位地质学家来做适当的解释。

20年代人们普遍热衷的地质构造的研究方式是设计实验室模型,研究层状塑性材料在主要是平行层面的压缩下发生变形的情况。按这种方式,所产生的褶皱与冲断层有点类似于野外岩石的行为。最著名的实验是由美国地质调查所 B·Willis 完成的,这在其一篇重要文章中作了叙述 (Willis, 1893)。Willis 用熟石膏作为硬层,蜜蜡作为软层,组成了他实验的地层。虽然他确实实现了类似于阿帕拉契亚构造的褶皱作用,但他必须给他的模型覆盖半米厚的铅板,使这些层不致拱起。因为阿帕拉契亚没有如此厚的覆盖层,所以这说明,Willis 的材料强度太大了,其他模型实验大多也有同样的情形,这就引起了对这种实验意义的怀疑。

德国波恩大学 H·Cloos 的工作取得了一些新的进展 (Cloos, 1929、1930)。1933年夏在华盛顿举行的国际地质代表会议上, Cloos 展示了十几个地质构造模型,这些模型同缩小到30cm 见方的真实系统十分相似。材料原来很软,后来流体状粘土发生硬化。

我最初的想法是这比以前的实验更远离实际。分析结果表明, Cloos 所用的材料实际上与为达到维度的相似性而具有所要求的强度的材料十分相似。的确, Cloos 是根据一种简单而又确实相似的准则来选择他的实验材料的。

到了20年代,关于岩石力学特性的资料还不很多,某些资料是关于建筑石料的压碎强度。F·D·Adams 和 J·T·Nicolson 完成了有关大理岩和其他岩石以及矿物的塑性变形的一些定性实验,但不是在三轴应力可以精确测定的条件下进行的。在围压条件下,大理岩变形的定量实验是由 T·V·Karman 在哥丁根大学完成的。在30年代,在专攻地质学的 Reginald 和专攻物理学的 P·W·Bridgman,以及他们的学生和助手 F·Birch 和 D·T·Griggs 通力合作下,在哈佛大学完成了关于岩石和矿物力学性质的重要工作。

1931年,本人成为哥伦比亚大学地质系的一员,我的第一个研究课题是发展构造地质学课程。很显然,当时最大的要求之一是把已有的变形体力学知识加以理论概括,并且贯彻到构造地质学教学中去。我到该大学不久就接待了一个谦虚的彬彬有礼的年青人,他自我介绍说,他叫 A·Nadai,原是哥丁根(大学)的应用力学教授,最近到达美国,在宾夕法尼亚州的东匹兹堡的威斯丁休斯研究实验室承担物质塑性研究。他随身带了一本他写的书《塑性》,此书刚由德文原版翻译过来并进行了增补(由 McGraw-Hill 出版),作为著名的工程协会专论的第一卷。他说,他早就对地质学中的岩石变形很感兴趣,想把这项内容作为他正致力研究的力学类型的一个实例,并说他在寻找一位可能具有类似兴趣的地质学家。

本人读了他的讲稿,并对他的书加以研究,还到东匹兹堡访问了 Nadai,在马尔堡讲演中所描述的实验之一是关于疏松砂子中的滑动现象。如果在一盒疏松的砂子中竖直插一叶片,象宽的抹灰刀,然后在垂直叶片的方向上水平地平移,于是会产生两个滑移面,它们从叶片的底边延伸到砂子的表面。在叶片的前面,滑移面将是一个倾角约30°的逆断层,在叶片的后面,将有一个倾角约60°的正断层。利用德国工程师 Q·Mohr 所创立的应力分析法也证明可以预期这一现象。

砂子的这种行为对于理解岩石的断裂力学具有很重要的意义,早已形成了这样一种概念:未褶皱岩层中的正断层,其断层面的平均倾角约为60°,而逆断层,这一角度约为30°。考虑到岩石的剪切强度,对可用于疏松沙子的摩尔理论稍作修改,就可证明这一理论也可解

释所观察到的岩石的行为。这也揭示出把正断层看作是由张应力造成的这一看法的错误。疏松砂子的抗张强度为0,但在水平拉张作用下产生具有 60° 倾角的很明确的正断层。疏松沙层中的正断层和逆断层,以及滑移破坏都是由大小不等的主压应力造成的。在每种情况下,滑移面都与中间主应力轴平行,且同最大压应力轴成 30° 交角。

在30年代后期,验证这一现象的仪器装置制造出来了,相应的摩尔理论也在哥伦比亚的构造地质教学过程中得到发展。

30年代的另一重要发展是1935年建立了国家研究会地质学、物理学与化学各学科之间的边缘学科委员会。此委员会的主席是地质学家T. S. Lovering。

虽然这一委员会的任务是研究地质、物理和化学之间的“边缘地区”,但实际所考虑的问题几乎只是地质现象的物理和化学方面。在第一年内,这个委员会对地质问题的物理和化学特性作了综合述评,有必要对这些特性进行研究。其中之一是确定岩石的物理性质,另一个则是适用于构造地质问题按比例缩小的模型的理论发展。

在总结委员会的工作时,Francis Birch主张着手整理一本岩石物理性质手册。本人写了题为“按比例缩小的模型理论在地质构造研究上的应用”的文章。为了搜集关于岩石的物理性质的资料,又指定成立了一个新的委员会,由Birch(主席)、构造物理实验室J. F. Schairer和美国地质调查所H. C. Spicer组成。结果出了一本《物理常数手册》。此手册的修订版在1966年出版,作为美国地质学会的97号论文集。J. Handin为此书写了一章“强度和韧性”。

按比例缩小的理论研究大致证实了这样一种似非而是的看法:地球是由坚硬的岩石组成的,它处于均衡状态,从冰期后抬升和造山运动看,又好象是由很弱的物质组成似的。这一理论证明(正如Cloos早期证实的一样),如果要模拟地球特性的实验室模型具有地球原来的特性,那么就要求模型加以缩小,例如缩小到地球的百万分之一,而材料的强度也要正好缩小到百万分之一。在线度和时间尺度都缩小的情况下,粘滞度也必须作相应的减小。

D. Griggs利用这些结果,根据大尺度对流的按比例缩小粘性模型发表了一篇文章(Griggs, 1939),其意义对于今天的板块构造学说来说,比1939年发表时更为明显。

考虑到构造地质学的物理学研究需要,学术交流上的方便以及出版上的需要,美国地球物理学会大约在1938或1939年任命了一个委员会,由M. K. Hubbert(主席)、David T. Griggs和A. N. L. Bowen组成进行工作。这个委员会向美国地球物理学会建议成立一个新的分会,N. L. Bowen提议命名为构造物理分会。全国研究会于1940年4月9日批准了成立这分会。

1946年前后,在壳牌石油公司对海湾海岸第三纪沉积物钻探时产生了一个工程问题:如何解决循环中断这一令人烦恼的问题,我们搞工程的同事们也正在讨论这个问题。当我来参加这次会议时,我对这一问题的实质还完全不了解。我所听说的是,当对这些沉积物进行钻探达到1500—2000米左右的深度时,水和其它流体的压力基本上是“正常的”或是静水的压力。之后,钻井便相当急剧地遇到高于正常值1.5倍的异常压力。为了防止井喷或钻井可能报废,泥浆的密度必须要提高到足以使井压高于岩石中的流体压力。假如泥浆的密度太小,则有井喷的危险;而假如密度太大,又有可能出现循环中断,被压进井管的泥浆便不能返回。在那种情况下,压力也要下降,井喷又有可能发生。循环中断是由于泥浆消失在由压力所产生的岩石裂缝中,问题在于压力仅仅为沉积物荷载压力十分之七的泥浆在力学上怎么有可能产生出破裂?

一旦理解了问题的性质，答案就显而易见的了。假设岩石应力状态是静水压的，所有三个主应力都等于覆盖层的垂直压力。利用砂箱实验，可以看到当砂子中产生正断层时，最小主应力是水平的，垂直于断层的走向，其大小仅是由覆盖物重量产生的最大应力的一半。在海湾海岸沉积物中，整个第三纪反复出现正断层活动，因此，大部时间的应力状态应当非常接近破裂条件，其最小应力要比覆盖物的应力小得多。因此，泥浆的压力只需稍微超过这一最小应力，便可产生压力引起的破裂。此外，这些破裂应当是直立的，并且是随应力而定向的。也就是说，正如 Anderson 在火成岩墙研究中已指出的那样，它们应当垂直于最小主应力，而平行于正断层区域系统的走向。

大约两年后，塔尔萨的斯塔诺林公司的工程师报道了石油生产的新进展(Clark, 1949, Howard 和 Fast, 1950)。他们指出，通过对油气井施加水压，储集岩石可以破裂，而这些裂缝通过注入充满砂子的胶而使裂缝保持开放。在介绍他们先前的工作时，他们展示了所测定的，为在不同深度产生水压破裂所要求的流体压力的图表。在大陆中间区的几百个例子中，破裂压力的平均数值仅仅是由覆盖层重量引起的压力的十分之八。虽然如此，这些作者都坚持产生的破裂是水平的层面破裂。在随后的六七年间这一解释在工业界几乎毫无异议地得到了公认。

1947或1948年间，当制定壳牌岩石力学计划时，我访问了在丹佛的美国农垦局的实验室，以得到他们为进行岩石和混凝土的大岩芯的三轴实验所研制的机器的资料。在那里，我见到了 D. McHenry，他给了我一份准备在斯德哥尔摩召开的第三次会议上宣读的报告副本 (McHenry, 1948)。他的理论对我是完全新颖的，其目的是为了用三轴实验测定加了封套和未加封套的混凝土圆柱的、与 Terzaghi 理论相符合的表面孔隙度大小。根据 Terzaghi，混凝土中横穿表面的抬升压力应当等于被沿表面的孔隙度所减少的总孔隙压力。例如，假定沿表面的孔隙度为 0.3，那么由流体压力作用于该表面两侧的块体的力应当只是穿过孔隙度为 1.0 的开放破裂的力的 0.3 倍。

McHenry 介绍了加封套和未加封套的 337 个混凝土圆柱的实验。然后，利用关于横穿破裂表面的正应力的摩尔理论，他解出了与 Terzaghi 假说相一致的表面孔隙度大小。最小二乘法解给出了平均值为 1.02 ± 0.019 。这对本人来说是难以置信的，因为在加封套的样品上主应力相等的应力状态下，孔隙压力确实应通过流体和固体而传播，因此应力消耗于加封套的外边界的总表面上，而不只是消耗在孔隙面积上。

具有内部流体孔隙压力的受力多孔岩石的力学行为问题在后来的两项研究中变得具有决定性的意义：油井中岩石的水压破裂力学 (Hubbert 和 Willis, 1957) 以及在逆冲断层力学中流体压力的作用 (Hubbert 和 Rubey, 1959; Rubey 和 Hubbert, 1959)。

1954 年，D. G. Willis 和我一起工作，他是刚从斯坦福大学毕业的地质-地球物理学家。我们的工作之一是试图解决当岩石由于施加水压而发生破裂时，在地下到底发生了什么情况这样一个问题。这时，用该技术来促进生产已经广泛进行，已对几千口油井进行处理。尽管所需的压力都一成不变地低于由覆盖层总重量所产生的压力，但原来认为这种破裂作用沿水平层面发生的解释，仍然普遍得到公认。这一反常现象被一些工程师们含糊地通过覆盖物的“有效重量”(它小于实际重量)来解释。外施压力仅仅超过此所谓的“有效压力”。

我和 Willis 按照本人在 1946—1947 年间为解决循环中断问题所提的建议进行了研究，并且对各种最初未受扰动的构造应力条件下钻井周围的应力进行了分析。结果取得相同的结果，

即在以正断层活动为特征的，如同海湾海岸和大陆中间这样的构造松弛区，破裂几乎都是直立的。

但是，我们碰到了新的问题，这些岩石不是干的，而是多孔隙的，通常充满着水，它具有自己的孔隙压力。这对岩石的力学性质会有什么样的影响？特别是，当流体穿过孔隙岩石向上流动而不是静态地作用于底部的不透水隔挡层上时，整个覆盖物能在水平破裂中被小于覆盖物总重量的流体压力所抬升吗？

我们通过支撑一个充满着静态和动态的水的松散砂子的圆柱进行理论的和实验研究。通过在砂子底部的不透水薄膜，支撑充满水的圆柱所需的水压力等于由圆柱的总重量产生的压力。随着薄膜的移去，水穿过砂子向上流动，浮力以流体力学方式分布在砂柱的整个体积之中。但是，当上升时，底部的压力与静态的情况时相同。我们的结论是：用低于由覆盖层总重量引起的水压力是不可能产生层面破裂的。因此，在构造松弛区由较小压力实际上所产生的破裂必定是直立的。现今这已完全得到证实。明确的证据表明，除非在不到几百米的浅部，几乎所有的水压破裂都是直立的，在活动挤压构造作用的区域如加利福尼亚的某些部分则是例外。

将这些认识扩展到地下的岩石力学，Willis 和我发现，McHenry 关于混凝土破裂的资料与 Terzaghi (1943) 晚些时候关于中性部分的总应力等于流体孔隙压力和固态中的有效分量的解相符合，但与 Terzaghi 早先关于上升力被表面孔隙度所降低的假说不一致。另一个结果是认识到孔隙压力的上升对岩石产生的弱化效应。这考虑两或三公里深处的松散砂子。孔隙压力为零时，这种砂子对覆盖物重量的反应与固态岩石一样。假如孔隙压力上升到能支撑覆盖层的总重量，这对砂子的强度要下降到松散砂子所具有的强度。因此，地下岩石的孔隙压力在构造变形期间对这些岩石的弱化应当具有强烈的影响。

为证明 Anderson 关于火成岩墙是侵入在垂直于最小主压应力线的轨迹的平面上的论点而同时进行的另一研究由 H. Ode 负责。Ode 利用科罗拉多西班牙峰的岩墙分布形态，对中西班牙峰侵入体及附近的洛基山前缘山脉边界的区域应力进行了分析 (Ode, 1957)。发现所观测到的岩墙分布形态与 Anderson 的假说非常一致。

孔隙压力对构造变形的可能影响获得重视是在1955年，当时有人和我在横穿瑞士阿尔卑斯山的野外旅行时，使我看到著名的格拉尔冲断层，沿该断层二叠纪的沉积物在近水平的面上逆冲到第三纪沉积之上达30公里的距离。问题是当断层活动时，覆盖层应当有多厚？伴生的水的孔隙压力应是多大？几乎可以肯定冲断块应有几公里厚，而在这样一个造山运动中，孔隙压力曾上升到可能的极大值，足以将覆盖层漂起来。这将大大降低移动这样一个块体所需要的力，也将解开这样一个事件在力学上似乎是不可能的百年之谜。

正当要写这一论题的论文时，偶然知悉美国地质调查所的 W. R. William 通过30年来对西南怀俄明冲断层带的野外工作，也得到相同的结论。这促进了我们的协作和两个姐妹篇论文的问世 (Hubbert 和 Rubey, 1959; Rubey 和 Hubbert, 1959)。

1957年前后，当这些论文的第一部分正在编写的时候，J. Haidin 来找我，他正感到困惑，因为 McHenry 的结果看来与 Griggs (1936) 早先对索伦霍芬大理岩的未加封套样品的三轴压缩实验所获得的结果不一致，在他的实验中，岩石样品的强度确实随围压的上升而上升。他推测这一自相矛盾的情况是与这种岩石和混凝土之间透水率的重大差别有关，然后他用高渗透率的维里亚砂岩重复进行实验。并回来报告他得到的新结果，他相信我会感兴趣的。

他给我看了这一系列实验的摩尔图解,有效应力范围达600兆帕而孔隙压力由0到200兆帕。投影为有效应力摩尔圆的资料给出了直线型的破裂包络线,其方程式为: $T(\text{MPa}) = 15.4 + \sigma \tan 29^\circ$ 。这里应力和孔隙压力的范围比 McHenry 所用的范围要宽,并且测定值的精度也更高一些,此结果基本上与 McHenry 的结果一致。这恰是我们逆冲断层文章中所需要的。因此,得到 Handin 的同意,我们将他的图解复制成 Hubbert 和 Rubey 论文 (1959) 中的图 18,它与 McHenry 的资料一起为许多分析结果提供了实验的依据。除了 Handin 在 1958 年所写的关于他和他的合作者进行岩石强度和孔隙压力之间关系的研究计划的摘要之外,这是一个开端,显然也是第一篇文章。由于专利的原因,Handin 他们的最终论文拖延了好几年才发表 (Handin 等, 1963)。在这篇论文中,他们根据各种沉积岩的实验,明确地指出,假如具备如下条件,有效应力律是确实可用的: 1. 孔隙流体相对于岩石的矿物成分来说是不活动的,以至孔隙压力效应是纯力学的; 2. 相对于变形速率来说,渗透率足以容许流体的渗透以及孔隙压力的连续平衡; 3. 岩石是具有互相连接的孔隙空间的集合体,以至孔隙流体压力完全可以传播到整个固体相中。另一要点是,他们证实了岩石也象混凝土、土壤及其它材料那样,在非弹性变形过程中可以压紧或膨胀,这取决于它们的成分、组构及孔隙度,而且也取决于有效压力。Terzaghi 原理的实验证明,对于许多岩力学问题的正确解决具有决定性的意义。

可以说自 1956 年加州大学地球物理研究所和壳牌开发公司联合发起的岩石变形会议以来,实验构造物理学进入了其成年期。大部分从事实验和理论构造物理研究的活跃分子 (在当时是人数不超过 50 名的小团体) 首次在一起聚会,除了 Griggs 的合作者和学生以及壳牌公司的研究人员以外,还包括 P. W. Bridgman, W. F. Brace 等人。在这次会议上宣读的论文,是在拖延了近三年之后才发表的 (Griggs 和 Handin, 1960), 这是因为一些关键问题需要重新考虑,特别是根据新发展的关于孔隙压力效应的资料。Griggs 和 Handin 的论文“破裂研究及地震假说”仍然是构造物理的参考文献中最常引用的文章之一。

自 60 年代初期,构造地质学及其有关学科领域飞速发展。目前,世界上 20 多个研究中心致力于这一学科的研究,而美国地球物理学会构造物理分会的会员也已增加到 110 名。近 30 年来取得的进展和成就不仅证实了而且超越了 1945 年所提出的希望和预期,即把物理学理论,适当的实验以及有关野外工作结合在一起的研究计划,必将能在 10 年之内使构造地质学建立力学科学的坚实基础之上。

(史兰斌、林传勇 译)

对浅地壳中断裂作用的认识—— 选择实验和理论研究的作用

D. W. Stearns G. D. Couples
W. R. Jamison J. D. Morse

一、引言

断裂作用是使许多地质学家既入迷又头痛的课题。野外地质学家,包括深部地质学家,对于断裂作用的兴趣主要是从动力学出发的,这是地质学家对断裂作用的历史推演和复原的需要。另一方面,实验工作者以不同的方式去对待断裂作用,并努力去研究引起断裂活动的机制,当断裂过程中重要的相关和独立变量可以用通式来表达时,理论研究者的好奇心就得到了最大的满足。本文扼要叙述了实验工作者和理论研究者在选择性努力,这些努力在解答断裂作用问题方面对野外地质学家显然是有帮助的。本文某些背景材料已在几种书刊上发表过。除了构造地质学家以外,其中许多文章并不是经常被引用的,不过还有不少地球科学家要涉及到断裂作用,所以我们试图将实验的和理论的研究结果综合起来,这对从事浅地壳中断层研究的学者可能有所裨益。本文不是为已经熟悉这一课题的地质专家所写的。

这里所说的实验和理论研究包括以下三大类:

1. 确立断裂作用准则的尝试(实验的和理论的研究)。
2. 某些类型的断裂作用的岩石模型。
3. 对野外地质学家有帮助的具体问题的解析法。对每一类分别进行讨论,而三者的内在联系是它们都有助于提高我们对天然断层认识的能力。

1942年, E. M. Anderson 出版了一本对我们认识断裂作用有明显影响的书。在这本书中, Anderson 确定了常见的断层类型与断裂活动过程中地壳浅部三个主应力方位的关系。Anderson 的观察结果表明,许多断层都与地球的表面相交切。这是这一研究的前提。由于地球表面是空气与岩石的界面,不能承受剪应力。所以它必定是主平面,包含三个主应力之一的垂直应力平面。在盖层导致最大主应力 σ_1 的地方,出现正断层。当最小主应力 σ_3 由盖层造成时,便形成冲断层。如果中间主应力 σ_2 垂直,那就形成走向断层。

那时 Anderson 假定,接近地球表面的三个主应力的方位不随深度而变(作为普遍的条件,这个假设是经不住时间考验的)。这个假设的某些含义在以后的几十年中得到地质家的热烈支持。一种意思是所有断层面在横断面内应当是直线的,第二种意思是浅地壳中导致变形的应力场应当是均匀的,所以在整个大区域内产生同一种类型的断层。这个假设得到承认之后,进一步表明了在一个区域里一种以上类型的断层的存在要求有一个以上的变形期。

由于不加思考地接受了这些思想,因此产生某些不恰当的问题。例如,一个通常的问题

是,对于某一区域来说,断层类型是什么?没有疑问,在地壳的某些地区内,一种断层类型看来是到处皆有的,这意味着贯穿整个大的岩石体的均匀应力场。然而,地壳中也有某些地区,那里存在不均匀的应力场,由于某单一变形期而产生多种断层类型。

二、断裂活动的判断准则

(一) 库仑准则

根据 Hempel (1966) 在试图解释作为其他现象的必然结果的某种现象时引入的一种理论,把前一现象看得更为重要的。Hempel 叙述道:“理论试图解释规律性,一般说是试图提供对有问题的现象更深入更精确的认识”。根据这个定义,我们现在还没有一种普遍适用的理论去解释断裂的作用,因为我们还不能清楚地理解诸如岩石物质中的摩擦,失去粘结性、破坏和滑动等本质问题之间的关系。为了克服对理论研究所必需的基本现象尚不完全理解的困难,库仑 (1776) 在他对剪切破裂的早期研究中创造了“内摩擦”一词,他没有将此发展成一种破裂理论,而正如 Handin (1969) 正确地指出的那样,是一种破裂准则:

$$\tau = \tau_0 + \sigma \tan \phi. \quad (1)$$

这个表达式表示当在任何平面上的剪应力 τ 超过了材料的粘结剪切强度 τ_0 加上垂直平面的正应力 σ 与“内摩擦”系数 $\tan \phi$ 的乘积时,将出现剪破裂(断层开始)。库仑 (1776) 认为,如果这个准则成立,那么当材料(其 $\phi \approx 0$) 所经受的应力差大到足以引起剪切破裂时,所发育的破裂面将与 σ_1 (最大主应力) 的夹角小于 45° 。这个角度偏离 45° 的值随 ϕ 值而变化。如果 θ 是 σ_1 与剪破裂面之间的夹角,那么

$$\theta = 45^\circ - \phi / 2. \quad (2)$$

库仑准则只适用于剪破裂开始,但是在地质学意义上,断裂活动要求在断裂开始之后出现明显的滑移。所以,即使可以证明库仑准则对岩石材料是成立的,还需要其他的一些函数关系来表达(描述)造成地质断层所需要的(断层)开始之后的滑动。这方面第一步是由 Rankine (1857) 作了研究,他把无拉张强度材料(砂子)的库仑准则修改为:

$$\tau = \sigma \tan \phi. \quad (3)$$

这个关系式可以同样应用于破裂开始之后的滑动,但在那样的情况下, $\tan \phi$ (内摩擦) 变成了 μ (滑动摩擦系数), 滑动条件为:

$$\tau = \sigma \mu. \quad (4)$$

如果在破裂形成和造成明显的断层所必需的滑动出现之间,横过破裂带可以重新确立某种粘结的话,那么这个准则又回到 (1) 的另一种形式:

$$\tau = \tau_0^* + \sigma \tan \phi^*. \quad (5)$$

式中, τ_0^* 是新的粘结剪切强度, $\tan \phi^*$ 是新的内摩擦系数。

虽然还没有一种可以由野外资料验证的合适的断裂活动理论,但是库仑准则和它的修正形式还是可以用作把断裂活动资料组织起来的相关关系。所以,我们完全同意 Handin (1969) 的见解:“库仑准则虽然有它的偏见,内摩擦的概念不能令人满意,但还是有用的。这个准则无疑已广泛而成功地运用于工程问题上,包括地壳浅部的土壤和岩石力学方面,而且毫无疑问,它的应用将一直继续到一种合适的破裂力学理论诞生之时。”

(二) 库仑准则的实验验证

在使用库仑准则作为认识断裂活动的辅助手段时,首先必须考虑到构成我们断裂活动这个概念的过程的范围。这里要区分开岩石材料不连续性的形成和岩石沿存在的不连续面的相对运动。第一个过程,即一个表面的形成,叫做破裂最为合适。严格地说,库仑准则(1)只适用于这个过程。第二个过程,沿着不连续面的运动导致“断裂”(4)。在探讨断裂作用一开始,野外地质学家必须把只与剪破裂形成有关的资料 and 同剪破裂变成明显的断层所需要的大小的滑动有关的资料 and 理论完全分开是极为重要的。

在实验室里对库仑准则的实验验证对野外地质学家早有好处。Handin 和 Hager(1957)系统而令人信服地表明,准则恰当地描述了沉积岩的剪切破裂,这类沉积岩是相当于地壳浅部围压范围内变形的。1963年,Handin 等人指出,当考虑到岩石中有孔隙流体压力存在时,利用库仑准则也是可靠的。同样,他们的文章以及 Jaeger (1959) 和 Paterson (1958) 都证实,即使内摩擦未能从物理学上识别,它的效应还是可以在实验室里测量的。

根据实验研究,Stearns (1967) 研究了与断裂活动相伴随的天然破裂。Stearns 发现实验室实验在小的尺度上很好地再现了沉积岩中的天然破裂活动。所以,断层区内断裂活动的类型和断层的走向可以通过研究露头规模的破裂来描述。可以确定两种产状,每一种对应一组共轭剪破裂,然而,也可以根据其他的地质学信息(例如,西侧下落的断层)去确定两组平面的哪一组平行真正的断层或在某些情况下是否存在平行这两组平面的断层。根据相同的实验研究,Friedman (1969) 建立了通过研究实际断层附近的微观变形特征来确定断层产状的预测方法。

剪应力和正应力对断裂活动的影响:当粘结强度、正应力或摩擦力下降时,断裂活动更容易发生。由于正应力 σ 和摩擦系数 μ 在公式(4)中是作为乘积项出现的,所以可见如果 σ 或 μ 接近于零,那么另外的数值就不重要了。

这一论述首先应用于解释逆冲断裂活动的有效应力律。这个应力律表明在任何面上的有效应力 σ_e 等于因埋深及构造运动引起的正应力减去孔隙流体压力。Handin 等(1963)的实验表明这个应力律对于许多沉积岩是成立的。Hubbert 和 Rubey (1959) 在分析逆冲断层作用时,采用了有效应力的概念。通过假定粘结力可以忽略不计($\tau_0 = 0$),他们确定在高孔隙压存在的情况下使很大的冲断层的运动要容易得多。

其他的地质学家对 Hubbert 和 Rubey 的假设提出一些颇有根据的疑问。Hsu (1969) 反对他们忽略粘结力;Forrestol (1972) 指出不均匀的应力条件可以预料在滑动岩席的底部达到。但是,主要的前提还是成立的:高的孔隙压产生断裂更为容易。

Hubbert 和 Rubey (1959) 把有效应力的概念具体地应用到由于重力滑动引起的冲断层上。但是,对任何一种断层类型来说,这个概念同样是可用的,而且,增大的孔隙压可能会使稳定的断层重新活动,这一点与丹佛(Evans, 1966) 和兰吉利(Raleigh 等, 1971) 的地震研究令人信服地证明的一样。在这些例子里,人工增大孔隙压引起了老断层的滑动,这些老断层在局部的流体压增大之前一直是稳定的。

当考虑到与断裂活动有关的孔隙压时,增压的时间长短变得重要了。有时趋向于只根据长期地质条件(可能或不可能产生高孔隙压的区域性事件)来考虑或不考虑孔隙压力的作用。不过,可以肯定地说,当低渗透率岩石滑动(断裂活动)的持续时间小于重新达到流体压力平衡所需时间时,就会有许多情况发生。在这些情况下,即使孔隙压在事件发生之后很久可以回到正常值,它在实际断裂活动过程中也可能是高的。下列情况是最可能的:

1. 当断层环境引起低渗透率岩石, 如许多页岩的快速加载时; 2. 当温度的升高导致流体膨胀时大于岩石的膨胀时 (Magara 1978); 3. 当含结合水的矿物出现快速脱水时。

Handin 和 Hager (1957) 以及 Handin 等 (1963) 也指出, 沉积岩的剪切破裂强度在低的正应力条件下大大下降。没有疑问, 即使在很小的构造应力和快速的碎屑沉积区内 (所以有高孔隙压存在), 断裂也是到处存在 (发育) 的, 就象在得克萨斯和路易斯安那海湾区的情况一样。

将有效应力律用简单的方程式来表示对于外推到自然界是很方便的。然而, 在野外却很困难, 并且往往不可能确定变形过程中是否存在孔隙压。在数学分析或实验条件下, 要产生高的孔隙压是比较简单的, 但是很难从野外观察结果作出高孔隙压以下的历史推论: 是否存在或在任何处出现与几百万年以前的变形作用相伴随的高孔隙压。

(三) 摩擦和强度对断裂活动的影响

在考虑两个岩体之间的相对运动时, 可以区分出两类滑动 (Stearns, 1978)。一类滑动 (A型) 含有分散的不连续面, 沿此不连续面发生部分滑动, 即某一层物质相对另一层类似物质滑动。另一类滑动 (B型) 没有这样的不连续面, 而是通过某种夹入物质 (例如, 夹有一层软的页岩) 的变形来实现滑动的。当谈到“断层”时, A型滑动是最常见的; 然而, B型滑动可能只是在断裂过程中, 特别是在冲断层断开的地体中观察到总的变形时才是重要的。

在 A 型滑动中, 滑动面的摩擦特征决定了断裂比较容易发生。在 B 型滑动中, 较弱物质的总变形行为是重要的, 所以断裂的易发性主要依赖于这些材料的屈服强度。

有理由假定在断层形成时沿断层的最大位移并不比单个地震事件在活动断层上引起的水平错移大得多。所以可以认为, 沿那样的断层位移的主要部分出现于断裂活动开始之后的某一时刻或时段。

如果只考虑 A 型滑动, 那么断裂活动必然是通过与两个相对运移的岩体的摩擦滑动过程而继续下去 (超过粘结力之后)。由 Logan (1975) 检验的实验室研究说明, 从方程 (4) 所表示的意义上看, 用摩擦来解释岩石相对滑动的所有微观过程并不总是合适的。这对于“干净”界面的情况是正确的, 当有“断层泥”存在时也是正确的。所以, 从微观机制的角度出发, 摩擦这个概念可能并不是非常有用的。然而, 在其他的意义上, “摩擦”是有用的。当摩擦这个概念本身不表示滑动的微观过程时, 无疑把这些效应并入到滑动的宏观应力条件的描述之中了。

从实用的观点看, “摩擦”包括了整个过程的各种效应, 但这些过程由于太复杂和量太大而无法直接包括到宏观分析中去。

野外地质学家很少能够确定哪种微观过程起了作用以及在断层面上滑动历史的哪一点或哪些点上的微观过程是活跃的。况且, 即使是可能的话, 也需要把这些测定结果概括成对确定滑动出现的物理条件有用的概念, 摩擦的概念满足了这个要求。

Logan 等 (1972) 的实验研究证实, 甚至发生 A 型滑动时, 取决于岩性的材料摩擦系数 μ 的变化对于野外地质学家来说是十分重要的。实验表明, 白云岩之间的相对滑动时 μ 值要比石灰岩与石灰岩之间相对滑动时低。而且, 当我们试验石灰岩与白云岩双岩性样品时, 最终的 μ 值更接近于两个石灰岩表面之间的 μ 值而不是两个白云岩表面之间的值。野外地质学家所得到的教训是: 并不是所有碳酸盐岩石之间所有的界面都具有成为滑动面的相同的潜