

地质力学的几个力学方面工作及其展望

地质科学研究院地质力学研究所 潘立宙

地质现象和地质构造现象中的物质运动既有简单的机械运动形式,又有复杂的其它运动形式。在漫长的地质年代里,地壳岩体在其运动过程中发生过多种变形和破坏。地质力学研究这些变形和破坏的方式、它们之间的生成联系,以及由它们所组成的各种构造体系,并根据力学原理探求它们发生的原因^[1,2]。地质力学是一门边缘科学,它的一条腿站在地质学方面,另一条腿站在力学方面,考察和研究反映地壳运动的一切现象^[3]。

一、地应力及其测量

地质力学重视力,特别是水平力在地壳构造运动中所起的作用。并认为,使任何物体发生机械的或是物质变化的运动都不能没有力的作用,没有力的作用就不会发生运动。地壳运动之所以能克服阻力不断进行,也必然是在地壳中长期存在一种力来推动它。为了确定这种力的大小和作用方向,通常是在组成地壳的岩石中,与力作用方向垂直的剖面上,划出一个单位面积,在这个单位面积上作用的力,叫做那里的主应力^[4]。这是地质力学从地质构造现象观察中得出的地应力概念。地质力学认为,地壳各部分所发生的一切形变,包括破裂,是它们遭受了地应力作用的反应。因此任何一种构造形迹,都反映地应力的作用^[5]。

在地质界,应力这名词有时用得异常广泛,例如由地球自转速度变化或地极移动而引起的惯性力增量也称之为应力^[6]。

地应力是否存在?它有无变化?这些问题在地质界似有争论。地质力学近几年来一直在地应力测量方面加强工作,采用的测量方法与岩石应力测量中的应力解除法相同^[8],测量结果不但证实了地应力的存在和变化,而且证实了最大主应力作用方向处处都是水平的或接近水平的^[4,5,11]。据说国外曾经有人在一个砷矿的矿山中做过同样的试验,那里的水平应力比垂直应力大五百多倍,甚至有的大到一千倍。这些结果同时说明了地壳构造运动中水平应力作用的重要性。

直接测量固体内一点的应力和应变是件困难的工作。在矿山工程实践中,许多人^[9]已经想出了一些试验方法,用来测定山体内一点的应力,应力解除法就是其中的一个方法。常用的应力解除是钻孔应力解除,这种测定应力的方法有人也称之为钻孔变形法,它的测量原理在文献[8]中有简单介绍,但对原理和测量技术,都还有必要去进一步研究改进。多年来,地质力学把这种方法用于地应力测量,在测量精度方面目前已超过国外水平^[10]。

地应力与岩石应力有何区别?此问题与地应力概念的内涵有关:如果把地应力理解为壳体中的薄膜应力,那末它应该是沿地壳厚度平均的应力,因而它不同于地壳中某一深度处的岩石应力;如果把地应力理解为地壳中一点的应力,那末地应力包括了岩石应力,另外,如果把地应力理解为引起地壳构造运动的应力,此时便须把地壳中不足以引起构造运动的应力排除在地应力之外;反之,如

果把地应力理解为地壳构造运动所导致的应力,那末地壳中由重力和地热导致的应力就不能算作地应力了。尽管人们在工程实践中很早就认识岩石应力了,但地质界对地应力的看法和解释至今众说纷纭。所以“地应力”这一概念尚须进一步明确,否则大家的认识很难取得一致。

从地壳每深 30—40 米地温增加 1℃ 看来,地热对地壳构造运动的影响不容忽视。在火山活动的地方,地热的影响必然更大。研究地壳构造运动时,应该进一步把地壳的温度应力也一起考虑进去。

二、水平运动的主导性

地壳构造运动是以垂直运动为主还是以水平运动为主?这是地质构造各学派十分关心和长期争论的问题^[3ii,4i,iii]。地质力学的看法是:在地壳运动中,水平运动占主要地位;至于次要的垂直运动,它可能在某些地区、在一定程度上反映了地壳的均衡代偿作用的影响,而在另外许多地区,则是由水平运动所引起的^[4iii]。地质力学是从自然界观察到的构造现象以及从力学理论估算出来的结果形成这一看法的。在野外可以看到许多以水平运动为主的构造现象,例如:褶皱剧烈地带往往发生巨型逆掩断层,造成远程构造位移;扭裂面两旁的岩石或某些标志往往显示一定距离的水平错动,扭裂面上往往出现大批水平或近乎水平的擦痕;近代强烈地震所产生的裂隙,其两旁往往显示相对水平错动的踪迹;大陆上普遍存在着中型、大型的扭动构造型式;沉积岩层上部构造与下部构造往往不一致而表现的脱顶现象等等^[5iii]。

地质界经常用简便的推论:水平(垂直)力主要产生水平(垂直)应力,水平(垂直)应力主要产生水平(垂直)位移,水平(垂直)位移主要产生水平(垂直)运动,反之亦然。

前一节已经提到,实测地应力的结果告诉我们:地壳上各点的最大主应力处处是水

平的,而且水平应力比垂直应力大得很多很多。地质力学又运用壳体薄膜理论的平衡方程在一系列简化条件下证明了水平地应力与垂直地应力之比近似等于地球半径与地壳厚度之比^[5iv]。

物探资料,特别是地震资料证明褶皱一般在地壳上层中出现,往一定深度去褶皱就渐渐消失了,这种现象很难用垂直力作用来解释,它主要是水平力作用的结果^[5v]。另外,由于地球自转角速率变快而引起的离心惯性力增量,其垂直分量仅使地壳重力减小,但其水平分量却符合地壳水平运动的要求,成为地壳运动的主要动力^[4iv,5vi]。

既然地壳所受的体力和应力作用主要都是水平的,用前述的简便推论就得出:地壳运动中水平运动占主要的地位。但地壳的形状、结构和它所处的条件都是复杂的,怎样的体力和边界力将使它产生怎样的地应力,以及此时地壳将发生怎样的位移和运动,都有待进一步深究。

三、岩石的力学性质

人们通过工程实践已经较多地掌握了岩石在短期受力下的力学性质。但一项工程的使用年限不外乎几十年、几百年,它与地质时代比起来是十分短暂的。地质构造中考虑的岩石力学性质是岩石在几十万年或几百万年这样长期受力下所呈现的力学性质。岩石的这种力学性质究竟是怎样的呢?地质力学认为,岩石长期在力的作用下是既具有弹性又具有塑性的物质,它的弹性与塑性是不分阶段而同时表现的^[5vii]。从煤矿的岩爆,大陆上许多地区的布格重力负异常,以及地震中的高频横波,看到了岩石的弹性表象;从大陆和海洋地区的高度均衡代偿,地震中低频、慢速和大振幅的塑性波,以及自然界岩石的弯扭形状看到了岩石的塑性表象^[5viii]。岩石在长期力作用下有“基本强度”吗?地质力学根据目前的资料认为尚不能无条件接受^[5ix,iiix]。

在背斜山岳的山坡上,岩层有时发生翻转褶曲;在第四纪冰川沉积物中发现了形状颇为离奇的弯曲砾石,还发现有些砾石的表面带有被坚硬小石子压成的凹坑,但这些岩层和砾石当时所处的环境:温度是不高的、压力是不大的^[4v,5x]。由此,地质力学找到了岩石在温度不高的情况下,那怕受极其微弱的应力作用,只要应力作用的时间很长很长,也会发生半粘性流动的根据^[3iii,iiii]。

地质力学重视岩石蠕变实验,希望在实验室内的常温条件下对岩石长期加力之后,岩石会发生蠕变而显现出各种构造体系;也希望在实验室的常温条件下,让岩石长期承受极为微弱的力,而长期观察其变形的发展,以期解决岩石在长期受力下有无“基本强度”的问题。目前已经做过的常温蠕变实验虽然证明了岩石常温蠕变是存在的,但离刚才所说的两个目标尚远,地质力学工作者正在这方面继续努力。此外,地质力学也重视高温高压对岩石蠕变的影响。

有许多因素能影响岩石的力学性质,例如:温度、围压、加力方式、加力快慢、含水率(或者含其它液质的百分比)、变形的历史等等。地质力学在三十年代初期曾在普通温度下用急速加力和缓慢加力的方法研究岩石的杨氏弹性模量,发现急速加力时的模量远大于缓慢加力时的模量^[iii]。

地质界普遍认为岩石材料在纵向受压(拉)时,其横向必然发生张(压)应力^[7i,12]。有人称这种横向应力为“诱导应力”或“导生应力”^[12,13]。地质工作者经常运用这个认识来解释岩石纵向受压(拉)时在横向所发生的膨胀(收缩)变形以及与此相关的地质构造现象。有些学者把这种诱导应力认识为原子或分子间的内力并且提出了菱形铰接杆系的力学模型来模拟其微观机制(图1)^[12]。关于这种微观力学模型所说的应力,它的大小如何规定?它的分布情况又如何确定?它与连续介质力学中应力的宏观定义有何关系?这些

问题尚待弄清,否则很难把它应用于宏观实际,特别是用于工程方面的设计计算。

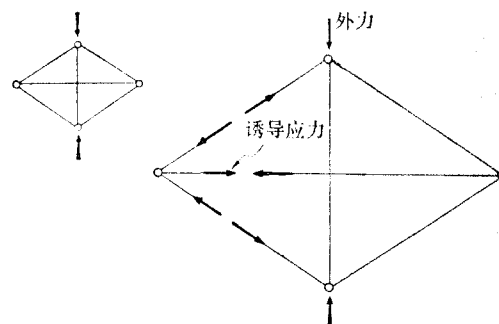


图 1

物体受力必在物体内部产生反作用力,因而产生“体力”和“应力”。体力使物体发生运动,应力则使物体发生应变(或形变)。如果受力物体是一个绝对刚体,则应力等于零,而体力最大。反之,若物体完全没有刚度,则体力等于零,而应力最大,这是另一位地质工作者对岩石力学性质的一个认识^[14]。

四、构造应力场和构造体系

地质力学指出:地质力学的力学方面工作主要在于研究各种构造体系中应力活动的方式,并且在既定的协调条件下,推断构造体系展布地区的边界条件,从而确定那一地区的运动方式。今后,在这方面还需要作大量的工作。首先应着重实地调查研究,确定各种构造型式的存在和它们的构造特征,然后进行有关应力场的理论分析,同时和模型实验结合起来,这样就有可能全面地解决各种构造型式的起源问题^[15]。

地质力学通过长期野外实践积累了许多经验,总结出来了许多认识构造体系、鉴别构造型式的方法^[5]。地质力学已长期从事构造模拟实验的研究:常用泥巴实验,模拟地块在体力和边界外力作用下构造体系的发生和发展^[15,16],又用光弹性实验,模拟构造应力场。泥巴实验目前只是定性的,因为泥巴和岩石之间流变的相似律尚未找到,所以试验还不能做到定量。

在构造体系形成的过程中及其前后, 地块内都有应力场存在, 而且前后各个阶段的应力场未必相同. 所谓构造应力场是指产生各种构造型式的应力场. 它区分为区域构造应力场和局部构造应力场, 前者是主要的, 后者是派生的^[5xii]. 在构造应力场的理论探讨方面, 地质力学工作者先后计算过山字型构造^[11iii, 17]、多字型构造^[18]、歹字型构造^[19]和旋卷构造^[20]等几个构造型式的应力场. 这些计算都是按弹性力学平面问题的解答进行的, 并且都得到了这样的结论: 构造应力场的主应力轨迹线与野外看到的和室内模拟的构造线是一致的. 这就是说, 地质构造线是构造应力场中主应力轨迹线的反映, 或者说, 地质构造线是沿着主应力轨迹线出现的.

山字型构造的应力分布

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{3(p-q)}{2h^3} \left(x^2y - \frac{2}{3}y^3 \right) \\ \sigma_y &= -\frac{p-q}{2h^3} y^3 - \frac{1}{2}(p+q) \\ \tau_{xy} &= \frac{3(p-q)}{2h^3} xy^2 - fx \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

是由图 2 所示的弹性平板梁得出的. 文献[1]指出, 其主应力轨迹线与野外构造线的地面排列及室内的泥巴试验所见如出一辙. 这表明图示平板的这种体力和边界力以及式(1)给出的应力分布是决定山字型构造型式的重要因素^[11iv].

多字型构造的主应力轨迹线是考虑了一块在弹性基础上边界受均匀剪力作用的无限

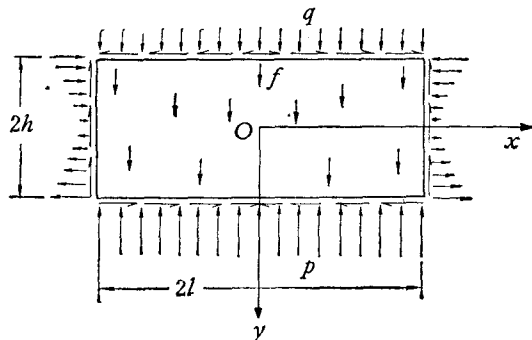


图 2

长平板的应力分布得到的(图 3). 显然, 当这块平板尚未翘曲时, 板内的应力场是均匀分布的纯剪状态应力场, 它的两族主应力轨迹线均与长边成 45° 角. 文献[18]十分谨慎地对此纯剪状态的应力场作了光弹性实验研究, 并指出, 这样的主应力轨迹线与板翘曲后的挠度分布和野外出现的多字型褶皱是完全吻合的. 文献[18]不但研究了多字型构造的应力场, 还用图 3 所示板的失稳形态研究多字型构造的形变图象, 发现它与柴达木盆地地区的实际构造型式的形态特征完全一致.

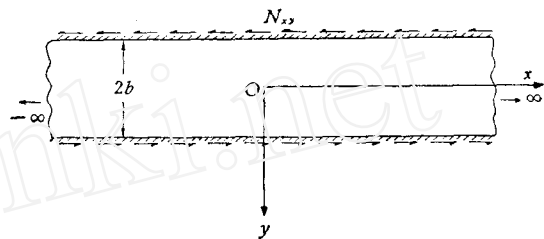


图 3

文献[19]从悬臂平板梁(图 4)的平面弹性解研究了歹字型构造. 同一作者在文献[20]中从圆环形平板(图 5, M 是力偶)的平面弹性解研究了旋卷构造. 这两篇文献的思路与文献[17]相同, 也即: 地质构造线是主应力轨迹线的反映, 前者沿着后者出现.

国内尚有一些学校和研究所按同样的思路, 但采用不同的力学模型, 通过计算求出模型的主应力轨迹线, 再用主应力轨迹线的图

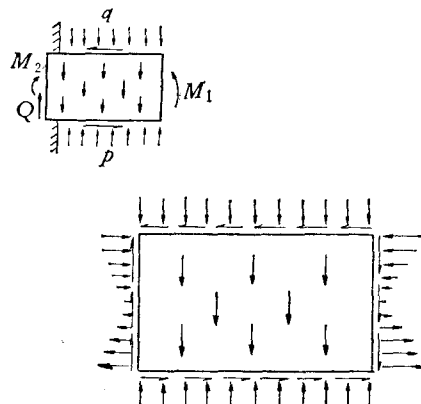


图 4

象说明山字型构造的形变图象,取得了新的结果。

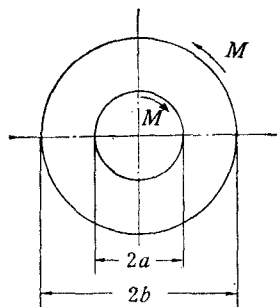


图 5

这里值得探讨的是:(一)我们知道,主应力轨迹线上各点的应力值不一定相同,有些点若是压应力,另一些点则可能是张应力。如果说断裂构造线与主应力轨迹线一致,那末究竟由哪些物理量来决定断裂在某点发生呢?断裂线为什么沿着那些大小和性质都不一律的主应力方向发展,也即为什么沿着主应力轨迹线发展呢?(二)如果说褶皱构造线与主应力轨迹线一致,那末究竟由哪些物理量来决定褶皱在某处发生呢?褶皱轴线为什么沿着主应力轨迹线发展呢?褶皱也许是由地块的平衡失稳造成的,但是,怎样从平衡方程^[21]

$$D\nabla^2\nabla^2 w - N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + kw = 0 \quad (2)$$

和边界条件看出薄板未失稳前其薄膜应力 N_x, N_y, N_{xy} 的主应力轨迹线,与失稳后其挠度 w 的几何形态特征相一致呢? [式(2)中的 k 是弹性地基模量,]文献[18]的图 5 给出了等挠度线,它的图 12 给出了用光弹性实验得出的均匀纯剪应力状态的主应力轨迹线。从这两张图看出,褶皱轴线与边界剪力方向的夹角为 34° ,但纯剪状态的主应力轨迹线与边界剪力的夹角是 45° ,两者相差是不小的。(三)主应力轨迹线是无穷曲线族,为什么甚至在完全相同的条件下,在有几条主应力轨迹线上有实际的构造线出现,在其余轨迹线

上不出现构造线呢?这三个问题必须解决,因为它们的解决将使“构造线即主应力轨迹线”的说法具有物理依据,并且将使研究工作由现象向本质推进一步。

构造应力场这概念的涵义是什么?地应力是否指构造应力?地质界对这些问题的看法不完全相同,例如文献[22]认为:一个应力场是由压应力、张应力及一对剪应力所构成,若能知某地区压应力的方向,主构造应力场即可定下来。今后对构造应力场这个概念也和对地应力概念一样,大家应该力求有个能反映客观事物本质的统一认识才好。

另一方面,岩石在长期力作用下既然具有流变性质,那末分析构造应力场和构造体系的形变图象时,其合适的力学模型当然就应该用流变模型,而且其中的流变参数应该是时间的函数,这是今后进一步工作的方向。

五、地壳运动的动力来源

引起地壳构造运动的动力是什么?地质力学认为,主要是由于地球本身自转角速率变化而导致的离心惯性力增量和纬向惯性力^[4vi, 5xiii],而诸如固体潮、极移等外因则是次要的。当地球变速自转时,其离心惯性力增量的水平分量促成纬向(东西向)构造体系,其纬向惯性力促成经向(南北向)构造体系,而且由于地壳各处与基底粘着的牢固程度不同,经向运动和纬向运动常被歪曲而出现扭曲构造体系^[4-ii, 5xiv]。

地球自转角速率的变化,近代有授时报告、历史时期有天文记录可资证明。在史前的地质年代里,地球自转角速率的变化则已由采集的古生物化石得到证明^[4viiii]。随着地球自转角速率的改变,水圈和岩石圈的变形程度是不一样的,所以海浸海退的古地理变化也能说明地质年代里地球自转的角速率是有变化的。地质力学认为,现在地球正处于其自转变快的时期,因为搜集的大量资料表明,第四纪以来,除了个别地区以外,极圈的海面

下降,近赤道地区的海面上升^[3iv]。

地质力学认为地球自转角速率变化的主要原因是地球内部物质的转移。从角动量守恒¹⁾的数学表达式

$$\omega I = \text{常数} \quad (3)$$

看出:当重物质向地心移动而靠近地轴时,地球的转动惯量 I 减小,同时它的自转角速率 ω 增大;反之,当重物质向地表移动而远离地轴时,地球的转动惯量增大,同时它的自转角速率减小^[5xv]。

地球自转角速率的变化也反过来促使地球内部物质的转移。当地球自转的角速率 ω 变快时,其内部物质的离心惯性力变大,于是一部分物质向地表移动而远离地轴,发生大规模的构造运动。这样一来,地球的转动惯量变大了,地球的自转角速率反而变小了,同时,跟不上地球自转角速率加快要求的大陆部分,也对地球起“刹车”作用。据此,地质力学提出了一个著名的论点,即地球在转快时本身具有自动刹车的车闸作用^[4ix,23]。

地质力学指出:现今地球的自转是加快的,但地球的扁度不能适应自转加快的要求,地球不得不改变地壳中的物质分布,使自己变成一个具有适当扁度的扁球体来适应自转加快的要求。地壳中物质分布的这种重行调整就表现为不断发生的构造运动。如果地球的自转速率始终是不变的,它的离心惯性力始终是个常量,那末地球在自转了已经几十亿年的近代,它的外形和内部物质结构应该早已达到了平衡状态,它就不会发生时起时歇的大规模地壳运动,这就无法解释为什么迟至第三纪乃至第四纪还会有东西向和南北向的构造运动发生^[4ix,5xiii]。

地壳上有许多纬向构造带出现^[4x],它们所在的纬度(有时称为临界纬度)大致是:北纬 57° — 58° ;北纬 $40^{\circ}30'$ — $42^{\circ}30'$;北纬 $32^{\circ}30'$ — $34^{\circ}30'$;北纬 24° — $25^{\circ}30'$;北纬 18° — 20° ;北纬 10° ;北纬 5° —南纬 5° ;南纬 25° ;南纬 34° 。为什么在这些纬度上会出现纬向

构造带呢?地质力学早在二十年代中期曾经研究过这个问题^[7ii]。当地球自转角速率增加时,地壳上各处的离心惯性力的水平分量是大小不等的。把地球看成迴转椭球体,地质力学通过计算发现离心惯性力增量的水平分量在纬度 $44^{\circ}51'12''$ 处最大,于是得到了一个 $44^{\circ}51'12''$ 的临界纬度²⁾。五十年代也有人研究过这个问题。文献[24]首先假设:当地球自转角速率改变时,地球由某个扁率大小的迴转椭球体变为另一个扁率大小的迴转椭球体,但地球的体积不变;然后在这些假设下撇开了地球物质的力学性质,单纯研究它变形的一些几何特征,于是得到了若干临界纬度值。大家知道,连续介质变形时,变前的点与变后的点须一一对应。文献[24]中的假设前提并没有交待这种对应关系。没有这种关系,如何去计算位移和应变呢?从这篇文献所给出的计算公式看来,似乎作者认为地球变形时,其上各点只有沿半径方向的移动,没有沿经线方向的移动。同一作者还考虑了地球的离心惯性力的一个分力,称之为变形力,它的势函数是

$$U = \frac{1}{6} \omega^2 (x^2 + y^2 - 2z^2) \quad (4)$$

由此得出作用在坐标 (x, y, z) 处单位质量上的变形力是

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{1}{3} \omega^2 x \\ f_y &= \frac{1}{3} \omega^2 y \\ f_z &= -\frac{2}{3} \omega^2 z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

他讨论了变形力的各种分力的情况,以及它们随地球自转角速率 ω 变化的情况,从中又得出了若干临界纬度。

惯性力乃是一种体力。受力物体各点的应力、应变和位移并不直接与该点所受的

1) 地质力学认为外界对地球的影响是微小的,可以忽略不计。

2) 文献[7]给出的纬度值 $44^{\circ}51'40''$ 似欠准确,可能计算有误。

体力成正比,所以,进一步研究纬向构造带的成因,除了要正确地估计体力和边界力的作用方式外,还应该把地壳物质的力学性质考虑进去,而且应该对地壳内的应力、应变分布和位移分布进行分析。这样做,工作量是繁重的,然而却是不可避免的。

地质力学的力学方面工作十分丰富,地质界运用力学有许多特色,本文仅仅介绍了其中的一部分内容。过去,地质学和力学都在各自的领域内活动,相互很少渗透,因而造成了目前地质工作者和力学工作者在认识机械运动规律和力学原理方面存在着一些差异。今后只有通过两方面工作者的紧密协作,充分交流经验,方能逐步获得正确的统一认识。地质力学是一门边缘学科,它需要各方面的工作者参加进来一起工作,尤其希望广大的力学工作者积极支援地质力学工作,为发展地质力学作出贡献,使这门学科更好地为无产阶级政治服务、为我国的社会主义革命与社会主义建设服务。

参 考 文 献

- [1] 李四光,地质力学之基础与方法,i)1;ii)13—14;iii)98—102;iv)100,中华书局(1947)。
- [2] 李四光,南岭东段地质力学之研究,地质论评,9,5—6(1944),347。
- [3] 李四光,1965,地质力学发展的过程和当前的任务,地质力学方法,i)259;ii)248—249;iii)256;iv)258,科学出版社(1976)。
- [4] 李四光,天文、地质、古生物资料摘要(初稿),i)115;ii)83;iii)85—86;iv)113;v)86后的图1(甲)、(乙);vi)113;vii)109—112,114;viii)113—114;ix)114;x)91—95,科学出版社(1972)。
- [5] 李四光,地质力学概论,i)12,93;ii)94;iii)38—39;iv)36—38;v)38;vi)129;vii)96;viii)94—96;ix)117;x)95—96;xi)99;xii)32;xiii)128;xiv)129—

- 130;xv)129,科学出版社(1973)。
- [6] 中国科学院北京天文台、北京师范大学天文系,223组,地极应力与地震,地震战线,1(1970),43—56。
- [7] 李四光,1926,地球表面形象变迁之主因,地质力学方法,i)9;ii)5—7,科学出版社(1976)。
- [8] Hast. N.,岩石中应力测量的一种方法(王宗杰摘译),地质力学论丛,第2号,153—177,科学出版社(1964)。
- [9] 科学技术参考资料,3期(1972),应力测量专辑,中国科学技术情报研究所。
- [10] 地震地质大队钻探队试验班,二十里长山之应力测量,地震战线,2(1975),26—28。
- [11] 李四光,关于旋卷构造及其他有关中国西北部大地构造体系复合问题一文的讨论,旋卷构造及地质构造体系复合问题(第一辑副刊),i)24—26;ii)24,科学出版社,(1958)。
- [12] Г. Л. 阿日吉列,构造地质学(秦其玉等译),34—36,中国工业出版社(1966)。
- [13] 中国科学院地质研究所大地构造编图组,中国大地构造基本特征及其发展的初步探讨,地质科学,1(1974),14(图5)。
- [14] 张文佑,辩证唯物主义在大地构造发展过程中的体现,科学通报,16(1960),294—295。
- [15] 李四光,旋卷和一般扭动构造及地质构造体系复合问题(第一辑),第二版,59—67及图版1—XVI,科学出版社(1959)。
- [16] 黄汉纯,几个模型实验,地质力学丛刊,第1号,255—265,地质出版社(1959)。
- [17] 李四光,1943,山字型构造的实验和理论研究,地质力学方法,125—130,科学出版社(1976)。
- [18] 黄庆华,雁行褶皱构造型式的解析理论及实验的探讨,中国科学,5(1974),492—500。
- [19] 阎恩德,夕字型构造体系的平面应力场之推导,地质与勘探,6(1973),26—31。
- [20] 阎恩德,旋卷构造平面应力场之推导,地质与勘探,6(1974),36—38。
- [21] S. 铁摩辛柯,弹性稳定理论(张福范译),318,科学出版社(1958)。
- [22] 中国科学院地质研究所工程地质与抗震研究室,岩体工程地质力学的原理和方法,中国科学,1(1972),41。
- [23] 李四光,1956,地壳运动问题(讨论提纲),地质力学方法,246,科学出版社(1976)。
- [24] M. B. 斯托瓦斯,地球自转的不均衡性——地球形态及大地构造的因素,地质力学丛刊,第1号,21—36,地质出版社(1959)。

(上接封三)

以及分析计算方法,等等,都跟二维的没有多少差别。所不同的是模型(三维模型)和应力状态(三维应力状态)变更了。根据这一特点,人们在实践中发现和采用了“冻结”切片法(或沿用这个方法基本点的其他方法),将

三维模型实验在方法上简化为二维模型实验来处理。所以,熟练地掌握二维光弹性实验的原理、方法及具体技术,搞三维光弹性实验就比较容易。