

构造物理模拟实验图册

张文佑 钟嘉猷 单家增 王在中 著



科学出版社

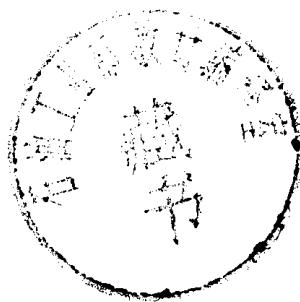
19974

构造物理模拟实验图册

张文佑 锤嘉猷 单家增 王在中 著



00279086



200305231



科学出版社

1985

内 容 简 介

构造物理模拟实验在研究各种构造形迹成因的动力学方面有重要的意义,对分析实际地质构造的形成过程和应力状态起到重塑的效果并检验其机理的正确性。

本图册是作者近 30 年来从事构造物理模拟实验研究的主要成果,共搜集照片 237 张,分别对断裂、褶皱、地堑、裂谷、深层构造对浅层构造的控制等专题进行研究。内容丰富多采,形式生动。

本图册可供地质、地球物理、地理等学科的生产、科研、教学人员参考。

构造物理模拟实验图册

张文佑 鍾嘉猷 单家增 王在中 著
责任编辑 李祺方

科学出版社出版
北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1985 年 4 月第一次印刷 印张:1 1/4 插页:32
印数:0001—4,000 字数:21,000

统一书号:13031·2909
本社书号:4278·13—14

定价:2.90 元

前 言

构造物理模拟实验在构造地质学中,尤其在各种构造形迹成因的动力学研究方面,有重要意义。虽然从相似性考虑,实验模型很难达到近似于地质构造实际形式,但是根据地质条件所设计的实验模型,在应力作用后所得到的结果即构造形态变化,是可以达到与实际构造现象近似的,这对我们分析实际地质构造形态的形成过程以及应力状态起到重塑的效果,增强了对地质过程的感性认识。

我们在这本图册中所展视的照片是作者近三十年实验工作的主要成果。其中有部分照片是本文第一作者张文佑教授在四十年代时所拍摄的。因本书只是一本图册,所以不能把各种构造形迹的形成过程一一叙述,只就实验所得的最终结果和形变过程的照片提供给读者,作为实验室中再现各种构造形迹的检阅。但因实验内容很多,照片也很丰富,限于篇幅,我们只就几个方面作一简单介绍,不作为实验总结报告,仅供同行们参考。对生产部门在生产实践中所遇到的研究不同类型构造形变规律、应力状态的对比分析以及在教学、科研等方面都有一定的参考价值。

在完成本图册的工作中,曾得到中国科学院地质研究所复照室桂文立同志的大力支持和张亚光同志的帮助,在此表示感谢。

目 录

前言

第一章 各种断裂形式的实验研究	1
一、挤压性断裂	1
二、拉张性断裂	2
三、剪切断裂	2
四、垂直作用力下生成的断裂	3
五、断裂面在走向上的形态特征	3
六、断裂面上的花纹与受力方向的关系	3
七、断裂的先后期关系	4
第二章 各种褶皱类型的实验研究	5
一、小皱纹的形成过程及其意义	5
二、褶皱与断裂的关系	5
三、褶皱形态与材料性质和层面滑动的关系	6
四、复合褶皱的形成过程与应力作用方向的关系	7
第三章 深层对浅层构造控制的实验研究	8
一、深层断块活动对浅层构造的控制作用	8
二、古地貌控制	8
三、岩性的控制因素	9
四、古构造的控制作用	9
五、相变带的控制作用	10
六、弧形构造与深层(即基底)构造运动的关系	10
第四章 地堑或裂谷的实验研究	11
第五章 光弹性材料的构造模拟	13
一、各种褶皱形态的应力分布	13
二、断裂受力作用再活动的应力分布	13
参考文献	14
图版	15

第一章 各种断裂形式的实验研究

断裂是地质体岩石中最普遍存在的一种构造现象,它的规模大到几百至上千公里长,小到几微米,用显微镜才能观察得到。从其成因考虑,它们大都受应力作用后所产生,而且断裂还分不同性质和不同组合形式。在地质构造上人们通常把大规模的断裂才叫断裂,而把小型的断裂叫节理,但我们都通称为断裂。现在岩石露头上看到的断裂,只是记录了地质历史上应力作用后所留下的遗迹,至于断裂在岩石中或不同构造部位上以及不同形式应力作用下的发生发展过程并不清楚。我们在构造物理模拟实验中,可以全面地再现这种过程,对每一条断裂的发展过程、以及断裂带或面上的伴生构造现象都能观察得非常清楚,而且这些现象又能和我们在野外所观察的断裂构造形式相吻合。因此,模拟实验显然将对研究构造地质学中一些基本概念和野外观察所得带有规律性的问题予以验证,而更重要的是对探讨有用矿产的分布规律有极重要的参考价值。所以我们对断裂的发生发展及不同组合形式的断裂进行模拟将对断裂的研究及其实际应用提供可靠的依据。

从断裂的力学成因考虑,一条断裂在它全部形成过程中,压、张、剪的受力状况同时存在,主要外力作用方式也可以改变。因而我们做了在不同外力作用下断裂形成和发展的模拟实验。

一、挤压性断裂

各种材料在挤压应力作用下断裂的形成和发展已得到普遍认识,当不同材料受外力作用后超过其强度极限,随即产生断裂,虽然所产生断裂都呈交叉剪切型,但由于形变率的差异以及材料性质和边界条件的不同,断裂的组合形式、空间分布方位也不一样。首先,在挤压应力作用下对于粘塑性材料来说,断裂常是呈密集的剪切网状,总的看来断裂面一般表现平直、光滑,方向性强。当作用力继续加大时,也常牵就二组裂面呈锯齿状张性断裂。经仔细观察,一条断裂在走向延伸上,并非是一条直线,而往往由一些相互衔接,长短不一的断线组成,有人称羽状排列或侧列式,这在实验标本上可观察的极为清楚。两组裂面间夹角多在 60° 左右。但随着材料强度的增大,在挤压作用下断裂的密度和两组裂面间的夹角也随之减小。另外,从实验结果看,作用力速度对生成断裂的密度和交角也成比例关系,即速度快产生断裂密度和两组裂面间的夹角就小,反之即大。

对地质体中各种断裂的空间分布是极为复杂的问题,尤其对于具体岩体中的断裂解析更是多种多样,甚至每一岩层中的断裂系统都不一样。地质体中受挤压形成断裂的边界条件可归纳为二种形式:在平面上一种是自由边界,另一种是限制边界。在粘塑性材料粘土和凡士林或松散介质的实验中,若在自由边界的情况下,X型剪切破裂网多产生在平面上,与地平面垂直,即中间应力轴 σ_2 与地面垂直。这是我们在实验中一般最常见的,这在地表的大型断裂系和局部地区或岩层的表面均可见到,即X型交叉断裂系在平面上

的表现。若边界条件受限制,在侧向挤压下X型交叉断裂系往往只产生在剖面上,即形成横卧的X型断裂,中间应力轴 σ_2 与地面平行,锐角等分线垂直于挤压应力方向。这时在平面部分将产生平行的断裂系,并呈低角度的逆断层,单条断裂在延伸方向上也同样呈羽状排列,参看图版4—10。

二、拉张性断裂

在地质体中受拉张应力场作用产生的断裂并不多见,大多数只产生在局部地区或局部构造上,而且很多的所谓拉张断裂是牵就前期的X型断裂系而形成。但是只要有受拉张应力产生断裂的地区或局部构造上,拉张标志都非常清楚。在室内实验或野外均可发现它们常呈带状分布,断裂面凹凸不平,在拉张初始时,对粘塑性材料来说,仍可产生微细的X型断裂网,所夹钝角是拉张作用力方向。另一方向上X型断裂的锐角多小于 60° ,随着材料强度的增大,夹角逐渐变小(可达 $20^\circ-30^\circ$),断裂面有羽裂现象但不明显。在这个带上的断裂只有两组,而且参差不齐,又因断裂是拉张性质的,所以在断裂平面的展布形式上多呈正断层性质,断面垂直。从实验结果说明,材料塑性程度越大,层越厚,这个带就越宽,若材料的刚度大,层越薄,带也就越窄。从剖面上看,可形成一套直立的X型断裂系,锐角指向上下,到了后期沿两断裂面形成正断层,这是在拉张作用力下产生的断裂系的一般特征。另一种是在拉张作用力下,牵就先期X型断裂系而产生的张断裂,它们是沿先期两组断裂面而形成的明显锯齿状断裂系。虽然它们的展布形式也呈带状,但从生成的断裂组系看,并不是新生的,常与带以外的断裂组系在方向上有明显的一致性。随着拉张边界条件的改变,如受底边界的影响等,断裂组合形式也不一样,这我们将放到后面谈,参看图版25。

三、剪切断裂

剪切断裂实验研究是断裂模拟中极重要的一部分工作,因任何一种断裂的产生和发展均导源于剪切滑动,或者说所有断裂的活动都包含有剪切作用。微观的晶格位错也都导源于剪切。从野外岩石中剪切断裂形态的观察,它们的活动方式大致可分为三种:简单剪切、张剪切和压剪切。因为剪切断裂的产生,同样受材料性质和边界条件因素的影响。模拟实验表明,一条剪切破裂带的性状,常决定于材料性质,脆性材料中表现为简单的断裂系,而塑性材料中表现为密集带状的断裂系。在这个带上的断裂空间组合形式,包含着不同剪切应力的作用结果。从带内的剪切破裂分布来看,一般总是接近剪切带方向的一组发育最好,通常把这组斜列的破裂叫做雁列,同时剪切带中的断裂形态变化很复杂,但最常见的有,S型、反S型、锯齿状和羽列状等。实验表明,这些复杂的形态变化,都是剪切带中断裂进一步发展所造成,并与作用力方式有直接关系。张剪切作用产生的破裂多呈反S型,压剪切作用则多产生S型,它们都是牵就早期的X型破裂发展而成。从受力状态上看,剪切带中的剪切破裂在排列方位上的改变,是剪切带两侧切向力与正向力呈各种比例的联合作用,而使主应力轴发生转变的结果。但剪切带上伴生构造的形态变化很多,仅羽列状构造的几何形态上就可分若干种,主要取决于主应力轴的改变,这里不做详细介绍(参看图版26—51)。

四、垂直作用力下生成的断裂

在地质体中直接受垂直作用力产生的断裂并不是主要的,但从动力学观点来看,垂直作用力在地壳形变驱动力中是与水平作用力互相依存的,只是在不同阶段以那一种为主罢了。如在已存在断裂构造的地区,常给下部岩浆侵入造成良好的条件,由于岩浆侵入可以造成垂直力作用。又如地表的拉张,造成了地壳减薄,岩体上拱或断块的相互垂直位移等等,都可造成垂直作用力。实验表明,断块的整体抬升,盖层部分主要在断块边缘产生变形、正断层或逆断层,另还可观察到,断层性质在垂向上是可以改变的,即常由底部正断层向上变为逆断层(图版 131—132)。塑性物质上涌造成的垂直力作用,使盖层减薄并形成正断层系,从平面和剖面上看都成为地堑或裂谷式构造。当完全受一点垂直应力作用的实验,不论所用的材料是塑性的还是脆性的,所产生的断裂系有两类(从上表面来看),层薄 0.5 厘米以放射状断裂为主,层厚 1 厘米则以环状断裂为主(指粘土材料),若用脆性材料,如松香等,在同一平面上则两种破裂形态同时出现,不同的是环状线多被放射状线所截。若我们用脆性并强度较大的材料作实验,把凸起面和凹进面分别观察,那么凸起面由于表面张力作用,断裂常呈放射状,而凹进面由于凹进点的加深,围绕凹进点产生了环状拉张作用,形成环状断裂(参看图版 56—59)。

五、断裂面在走向上的形态特征

本文前几段主要介绍了不同性质的断裂或断裂组系的几何形态特征,对于一条小型断裂或巨大断裂来说,它们在走向延伸上并不是平直的,除常呈锯齿状形态外,均表现为羽列状。通过我们在野外的观察和室内实验结果认为,羽裂现象是一条断裂在走向延伸上的基本特征。对分析野外断裂活动时受力方式是极为重要的现象。在实验标本上这种现象更为清晰。沿一条断裂常发育次一级裂面,就是我们所说的羽裂,它们的排列组合形式和与断裂之间夹角的变化,以及由羽裂所组成断裂带的宽窄,羽裂面间衔接的长短、宽窄以及空间位置的变化等均取决于材料性质与边界条件的改变。羽裂的排列组合形式呈顺时针时,区域剪切应力为逆时针,反之则为顺时针(图版 39—42)。

六、断裂面上的花纹与受力方向的关系

如岩石或其它物体包括粘塑性、粘弹性以及弹性、脆性体在受力断开后,断面部分都具有贝壳状断口一样的花纹,并显示出一定的规律性。从野外所观察的破裂面上的花纹看,可分为三种:羽裂形,多与拉张-剪切作用有关,如在一条垂直于岩层的断裂面上,其面上花纹的单个纹路由岩层的上层面向下常呈楔状,即上宽下窄,岩层的上层部分为楔顶,下层部分为楔底,至之尖灭。随着作用在断裂面上剪切-拉张分量的改变,楔形陡坎的密度和宽度也随之而变,即张应力的分量越大,陡坎的密度和宽度就越小,反之即大,这在模拟实验中也可得到证实(图版 65)。第二种为单羽扇形;它们也都产生在断裂的裂面上,总的看来这种具单羽扇的花纹,往往在上层面部分为羽裂型,有不明显的楔状现象,到了下层面部分,即楔的底端点部分有弯转现象。这种现象我们在实验里主要产生在脆性材料中,产生这种现象的作用力方式是材料薄板上拱所造成(如图版 62),塑性材料表现的不明显。最后一种为双羽扇形;断裂裂面上的双羽扇花纹,在野外岩石露头上是普遍存

在的现象,它的规模常以岩层的厚度为最大尺度,岩层有多厚,双羽扇的花纹就有多大,薄到页岩的裂面上都可出现。从脆性材料薄板以及韧性材料薄板的纵向拉张实验结果可知,这种具有双羽扇花纹的裂面,均与纵向拉张应力有关,双羽扇弯转所指方向为拉张方向(参看图版 64),通过对野外裂面上不同种类花纹的观察,并结合局部应力场分析,均可证实它们是由不同方式的纵向拉张所造成的。

七、断裂的先后期关系

断裂的先后关系,实际上是断裂的分期配套问题。如前所述,在实验标本上断裂的发生发展是有独特规律性的,如粘土标本所表现的 X 型断裂系,锐角相交的方向为主压应力方向,伴随断裂产生的还有次一级的断裂构造(羽裂),这些次一级断裂的组合形式即空间上的展布,与应力作用有密切关系。若受一次以上不同方向的挤压作用,便可产生多组断裂构造。在野外的一个地区或在室内的一块标本上如何确定它们的先后,就要分析不同期断裂的分期配套。岩体已存在的断裂组系与方向和再次外力作用后能否构成新的应力场,要看它们和第二次主压应力轴间夹角的关系。根据我们在野外观察以及室内模拟实验结果证实,断裂的组系在岩体中不是无限的。从全球范围看一般只存在四个主要方向的断裂系,即由两次应力作用形成两套断裂系,甚至在一个露头上也同样只存在二套四组节理。我们把这种破裂存在的关系,叫做破裂的极限值(只在平面上的表现)。如何区分这两套的先后关系,首先观察断裂在总方向上的一致性,以及羽状破裂排列所表示的同期性和断裂间的相互限制关系。从实验标本观察,当第二期挤压应力方向即压应力轴与先期压应力轴垂直时,便常形成新应力场,而产生第二期的断裂系统,由于实验材料的强度和实验边界条件上的变化,所生成断裂间的相互控制关系也在改变。一般强度小的材料,第二期断裂常被第一期断裂控制,表现为不连续的断线,但不是错断。若材料强度大或脆性材料,后期断裂将常切断前期断裂,表现为切断关系。在第二期应力作用时(挤压),先期 X 型剪切断裂所夹锐角有变小现象,在两组裂面的尾端变化上,从实验标本观察,同期的断裂尾端常牵就两条裂面而呈锯齿状,这里我们不做详细论述。

第二章 各种褶皱类型的实验研究

褶皱同断裂的模拟实验研究有同等重要意义,在地质体中褶皱构造是岩石形变的最突出标志,它所反映的是岩石塑性形变的结果。根据我们野外观察和大多数构造物理学家们的研究结果证实,岩石产生塑性形变在沉积岩中多属常温常压下进行的,但在变质岩中又有很多与高温高压或高压低温,高温低压有关。再者则是在漫长地质年代中由时间能量所造成的褶皱,当然这是因地质体形变期漫长的独特特点所决定的。这里我们仅从褶皱形式和岩石性质之间的关系论述,可以把由弯褶皱到流褶皱都看作是受温压控制所致。从实验室中来模拟这种形变规律的可能性有两种方法,其一用原岩在高温高压容器中,变换实验过程中温度与压力,使其原岩达到塑性化而产生褶皱。其二则是直接用不同粘度和强度的塑性材料,模拟褶皱的形成过程,但多数研究者都采用后一种方法。通过我们对野外褶皱构造的研究,尤其对各种褶皱类型以及它们空间的展布形式即褶皱在走向延伸上的叠加关系和褶皱形态与岩性组合的关系,深层(基底)构造对浅层(盖层)构造的控制作用等说明,褶皱构造的形成是受多种因素所决定的。同时应予指出的是,褶皱和断裂是岩石形变过程中不同阶段的两种形变表现,从微观结构变化上看,也有同样的形变过程,所以二者是不可分开来研究的。在模拟实验过程中也可看出这种形变关系的重要性,张文佑教授强调指出:“褶皱可以引起断裂,断裂也可引起褶皱”。我们这里所谈到的褶皱模拟,系指几种在地质体中常见的褶皱形式,并不包括所有对褶皱的研究内容。

一、小皱纹的形成过程及其意义

在塑性材料如粘土、凡士林油等,挤压实验初始时,常在实验模型表面产生很多小皱纹。据我们在野外观察和室内实验结果对比后发现,野外岩石表面的皱纹(似鳞片,所以也叫鳞片状构造)和实验模型表面的小皱纹,初看上去很象是一些密集排列的小褶皱,但当我们详细观察后发现,这些小褶皱并不生根,在垂向上呈楔状,不穿层,小褶皱或皱纹的短轴方向为挤压应力轴方向,又因皱纹在实验标本上只是形变初始时的表面现象,所以,当进一步挤压时,便又产生一套密集的X型断裂系,所有断裂都切过小皱纹。这在野外岩层表面也是普遍存在的现象。从实验模型中小皱纹的形成和发展过程看,在确定局部或区域应力场时,小皱纹的空间分布形式可起到很重要的作用。在局部或区域性节理力学性质及分期配套标志不清情况下,可用小皱纹的短轴方向来确定主压应力轴方向。因小皱纹没有穿层性,所以在野外观察时,有的地区每一岩层的表面部分都有出现,同时与具有穿层性的同期节理并存。穿层性的X型节理的主压应力轴测量结果表明,若它与小皱纹短轴即挤压轴一致的话,那么我们可以确认是同一应力作用下形变的两种现象。当我们把这两者即皱纹和节理配合起来研究,对分析区域挤压应力场意义很大(参看图版14)。

二、褶皱与断裂的关系

我们在前一部分已简叙了断裂的基本形变规律,这里着重将褶皱与断裂的关系谈一

下。岩石形变受温度和压力影响常由塑性阶段到断裂阶段,实际上与地质体中的褶皱到断裂相对应。从褶皱的微观现象观察可知,在褶皱构造形成过程中存在有许多微断裂。所以说它们是相互制约又互相转化的关系。据我们对野外褶皱和断裂观察与模拟实验结果认为,一般岩体或实验模型在应力作用后常是先褶皱后断裂,但在实验室中还有一些特殊现象值得注意,因为也有很多褶皱是由断裂而引起的。通过模拟实验我们发现,断裂在形成褶皱构造中所起的作用,以及它们生成的先后关系,主要取决于模型材料性质。如在一个由不同性质的材料所组成的叠层模型中,若下部为脆性层,当模型受侧向挤压时,一般脆性层先于错断,并在应力继续加大的情况下,脆性层上拱使得上部塑性层产生拱曲,形成背斜构造。另外一种情况,即同是塑性材料组成的叠层模型,由于上覆压力大,在侧向挤压后,模型中的断裂常发生在底部层,又由于底部层断开的部分位移最明显,所以在这个断开层的上下部分都受它的控制,这里主要指对上覆层的褶皱控制。另外,在我们用湿粘土材料作成的模型中,若经侧向挤压后,模型发生隆起,在隆起顶部常产生一套沿隆起轴方向的断裂系,这在湿粘土模型实验中是极普遍的一种现象。这种现象在地质体中,大区域或局部地区及个别构造上都可出现。

总的说来,褶皱和断裂的关系,从宏观现象观察以及模拟实验过程告诉我们,它们多是由褶皱到断裂的。但在粘塑性、塑性材料所产生的褶皱模型中,从微观结构看无不包含着断裂,然而断裂在塑性材料中并不能控制褶皱的发展及其类型,还要看单层介质的材料性质(参看图版 91, 94)。

三、褶皱形态与材料性质和层面滑动的关系

从褶皱模拟实验过程观察,决定生成褶皱和褶皱形态的主要控制因素有:(1)组成实验模型各叠层材料的力学性质:因在组成模型中各层的材料强度和粘度以及各层应力传播速度都不相同,因而加载后形变也不一样,在同等应力作用下,强度小的易变形,但应力传播慢,反之不易变形,应力传播快。如在一个大的隆起构造上,强度大的层常作为隆起的骨架,即变形明显,强度小的层变形弱,但当应力继续加大的情况下,弱层产生塑性流动,即向隆起顶部流动,形成顶部加厚现象。若同是强度大的层组成叠层模型,在有上覆压力或没上覆压力时,都可出现脱顶现象,不过一般常是上覆压力越小脱顶就越大,反之即小。(2)模型中各叠层间的层面滑动程度:层面滑动是形成褶皱的重要条件,因在侧向压力下,每一单层的运动速率,由于材料性质的不同而不均一,使之在纵向上出现了差异性运动。也就是由于这种差异运动,才促使了褶皱的形成。若我们在实验中将水平叠层材料组合的模型,立放在加载槽中,当侧向挤压时是不会产生褶皱的(图版 142, 148, 149)。另外在实验过程中还可清楚看到,层间滑动条件越好,在平行层的挤压作用下所生成的褶皱就越紧闭,褶皱幅度也大,而单层厚度变化小。在强度较大的层中也常可看到脱空现象。若侧向压力作用在水平岩层上,压力轴不平行,而在垂向上下偏离呈一对力偶作用时,或在这一层段中层间滑动不均一,常形成不对称的膝状褶皱。在层面滑动不发育的叠层模型中,由于单层模型材料性质的不同,因而它们的运动速率也不相同,便造成层与层之间的相对滑移,如在叠层模型中的弱性层即可造成层间的滑动条件。又如在一套叠层模型中,受侧向挤压时,总会出现似横梁弯曲时的应力状态,这时在模型中,相当横梁弯曲中所存在的中性面,常出现在强度小的塑性层中,这个中性面在模型中主要在褶皱模型

的两翼部分也常表现为剪切作用,而在这个面的上下层部分,应力状态不同,所以变形也不一样,我们把这种现象看作是层间滑动的一种类型。不过由中性面存在作用造成的层间滑动,在地质体中并不普遍,若存在的话,往往是由一组软岩层所代替,不是一条线或面,而是一个带。这个带的存在位置,取决于受力岩层中软岩层的位置。在这个滑动面或带上的形变有多种类型,如表现为剪节理、剪褶皱、压碎岩带、层间劈理化等,这种在滑动面或带上的构造现象,使得岩层在垂向上构成了不协调构造即所谓的构造上下不复合现象。从全球构造看,岩石圈内各壳层间也都存在滑动面,它除去与介质不均一性有关外,也受中性面的控制。(3)上覆压力变化对叠层模型形变的控制:根据模拟实验结果证实,实验模型在侧向挤压下,叠层材料的形变规律常随上覆压力的变化而变。在性质相同的叠层材料实验时,一般常是上覆压力大,褶皱易产生在模型的下部层,上覆压力小则褶皱易产生在上部层。这种通过上覆压力变化对模型形变的规律性认识,可与地壳垂向上即由浅部到深部的形变不同相类比,也是不协调构造的一种控制类型。另外,它们不但在褶皱形变上有明显差异,而且在断裂的分布规律上也不相同。从模型中的断裂分布形式看(指剖面部分),上部层多形成横卧的X型断裂系,底部层则多形成直立的X型断裂系,它们两者间在垂向上断裂的表现形式为过渡型(参看图版94,95)。(4)边界条件的变化也是形成不同褶皱类型的重要控制因素。在褶皱模拟实验中甚至包括所有地质构造的模拟,与实际地质体边界条件相似是非常重要的,我们在实验室中所进行的各种类型的实验模型边界条件,都是根据地质构造现象和地质资料所提供的依据而设计的。对于褶皱类型在大区域或单一构造上的表现形式与所处边界条件的关系,首先是底边界的控制,即我们所说的深层对浅层的控制作用。其次则是侧边界的控制,在实验中的侧边界,系指挤压面的形态变化。对叠层模型中褶皱形态的控制,在大区域上一般情况与区域边界挤压面的角度变化有关,即褶皱轴面常随边界挤压面倾角的变化而变,褶皱轴面与挤压面平行,这主要与在挤压面一侧各层实验材料的应力传播速度有关。

四、复合褶皱的形成过程与应力作用方向的关系

在地质构造中复合褶皱是极普遍的一种现象,当在大区域上,不同时代、不同走向的褶皱出现复合时,是比较容易分辨的,但当在同一套地层中遭受了不同期应力作用,或同期应力作用而在方向上不同情况下如何辨认,我们进行了若干次模拟实验。对变质岩中微观复合构造变化的研究,已有很多人从事这项工作,并从理论上作了不少模式,这里我们只是从模拟实验角度来阐述宏观复合褶皱构造的相互关系。因为这种构造形式对分析区域或局部应力场,以及它们相互控制和改造关系非常重要。模拟实验结果表明,它们只存在两种关系:即先后期和同期。在先后期中,若后期的褶皱轴与前期正交,这时前期的褶皱轴常被改造,被改造部位常在它们复合部位上,而后期的褶皱轴线延伸也受前期褶皱线的控制,并多被截断呈断线出现,总方向上不连续。若后期挤压应力轴与前期褶皱轴之间的夹角小于 90° ,即在 45° 左右时,常呈截接式复合构造,后期褶皱线被前期褶皱线的控制,但接合自然,可明显的区分前期褶皱呈线状,后期为不连续线状,这是它们的一般特点。当两个方向的力同时作用在实验模型上,从褶皱轴线的延伸方向来看,均呈不连续的复合曲线形式出现,即为S型,然而从各曲线曲边延伸方向上,仍可组成有规律性的几何图形,如菱形或X型网状构造,它们之间没有限制关系(参看图版121)。

第三章 深层对浅层构造控制的实验研究

在构造地质学中,深层对浅层的控制关系常用基底控制盖层来表示,并常把基底看作是古老岩系或岩块来看待。从模拟实验角度考虑,并结合野外和深部地质资料分析,用深层对浅层的控制作用一词,要比基底对盖层控制更具有实际意义和理论意义。我们在论述模拟实验中有关边界条件相似时已指出,地质体的边界条件包括了三度空间各方向上的几何形态和应力作用方式以及先存边界状态,当然我们这里主要谈深层几何形态的相似。任何对浅层来说的深层都可对上部层起控制作用,如从地层时代上看,二叠纪地层中的构造就可控制三叠纪,岩层与岩层也可相互控制。这里特别需要指出的是,深层对浅层的控制作用是相对概念,因为,浅层反过来也可控制深层,这主要取决于地质构造的实际条件。在模拟实验中深层的概念系指模型在底边界或下部层的形态、结构、材料性质等变化上。虽然在规模上人为的模型很小,远远不能和大自然的构造形式相比,但在各种实验条件变化的情况下,得到的变形现象是可以和野外地质构造相类比的。模拟实验标本所表示的不但包括大型构造中的深浅控制关系,也包括了小范围或不同形式的深浅控制关系,如断块、地貌、古构造、岩性等。

一、深层断块活动对浅层构造的控制作用

由深层断块活动而造成浅层构造形变的研究,是大家所关注的问题,尤其在大区域上这种控制作用极为明显,即在地貌或地形上以块状形态出现,界线分明。若在小区域上,断块也以小型的为主的话,表现的也非常清楚,如在湘鄂西、桂北等地区,这里的断块形式表现的非常突出。张文佑教授认为,有很多大规模的箱状构造或梳状构造都是受断块区的隆起和凹陷而造成的。我们在实验中,根据不同地质条件以及断块的组合形式和活动方式,设计了模型,并把平面和剖面部分的形变特征分开来实验,实验结果表明,凡有断块存在的模型,上部层的形变均受其块体的控制。又因块体顶部常是平坦的,所以在块体抬升、下降或倾斜时,块体顶部不管在平面还是剖面模型上变形最弱,而块缘变形最强。若隐伏块体相互作剪切运动,块体上覆叠层表面,相当于深层块体的接界部分的上部,常出现雁行排列褶皱。当深层块体整体推移时,在块体推进前缘和两侧边常构成弧形构造,然而在上覆叠层材料强度大时也可形成剪切断裂带,如断裂模拟部分所述。这些都是深层对浅层控制的现象,若我们在模拟中将块体铺放于塑性叠层中间部位,当侧向挤压时,由于块体强度大,首先受力并沿断块边界产生滑动,这时断体边界的上下叠层均随之变形,尤其块体下部的塑性层,常随块体的上升而插入两块体间,与岩浆侵入形式相似,因而我们认为地壳内岩浆侵入多数与断块和断裂有关,甚至地幔上涌也往往把它们作为上涌点或通道(参看图版 136)。

二、古地貌控制

在深层对浅层控制作用中,大多数人往往对古地貌或地形的控制作用不加考虑,从构

造物理模拟实验的相似条件看,边界条件尤其在地质体中底边界条件的控制因素是极为重要的。古地貌或古地形的控制有两种形式:一种是古地貌连同上覆叠层在侧向挤压下一起变形,一种则只上覆叠层在侧向挤压下沿古地貌的顶面变形。这两种形变结果明显不一样,当受侧向挤压时,若具有隆起和凹陷的底边界背景下,上覆水平叠层变形规律,常成为反相构造,即底边界是隆起型,上覆叠层则形成凹陷或向斜构造为负地形,若底边界是凹陷形,则上覆叠层形成隆起或背斜构造为正地形。这种现象在地质构造中,尤其在区域构造中经常出现。另外,古地貌的类型还有很多,除弧状隆起或凹陷外,还有陡坎形、阶梯形等等,这里不作详细论述。但从其形变看,虽然古地貌的类型千变万化,然而古地貌上部叠层的变形,很少为继承性的,多数为上下不协调构造,即为明显的“反相构造”特点,参看图版 127, 139, 140。

三、岩性的控制因素

在深层对浅层控制中,岩性变化也起很重要的作用,因在地质体的整体变形中,由于各岩层岩石性质的不均一,所以当在侧向挤压时,每层的形变速率不同,变形速度快的常是强度大的层,并常控制变形慢的即强度小的层。这在模拟实验中表现的非常清楚,如浅部脆性层的拱起导致深部塑性层在拱起部位的加厚或在加厚部位产生密集的断裂,若脆性层的上下部分为厚塑性层时,因受上下层控制,这时薄脆性层变塑性化。若在脆性层中夹薄层塑性层,也可促进层间滑动,造成上下层变形不均一,即起到上下层的相互控制关系。又如煤系地层的上下层相互控制关系,一般煤层变形都是剧烈而又复杂,而顶底板变形轻微,就如我们在模拟实验中所得到的结果一样,模型中的顶底板常起控制作用,所以,岩层或岩石的力学性质对构造形变体的上下层控制关系是非常重要的,参看图版 77, 97。

四、古构造的控制作用

我们这里说的古构造主要指深层褶皱和断裂对浅层的控制作用。关于深层褶皱对浅层形变的控制,从地质构造实际资料和室内模拟实验考虑,可分为两种类型:一种为全形褶皱型,即上覆叠层覆盖在一个或几个完整的褶皱构造之上。一种为单倾斜形,即上覆叠层覆盖在单斜的一翼或同斜褶皱构造之上。从广义上说它们所表现的控制关系都属继承性,在全形褶皱控制情况下,多数底部是背斜构造(除同斜褶皱外),顶部还是背斜构造,但形式继承而形态不继承,只是在深部是背斜而浅部相当的部位也出现背斜。这时在浅层出现的背斜构造,受挤压造成的伴生构造不明显,甚至在有的模型上由于深层的形变速度大于浅层时,上覆叠层主要表现出受垂直作用力而产生的构造迹象,这种现象我们在模拟实验中同样称为继承性构造。另外一种为单倾斜形,这时在下部即深层构造岩层的倾角小于 90° 时,侧向挤压后,深层活动方式均沿已存的层面滑动,而且常选择在软层中。上覆水平叠层的形变点就在深部层与上覆接触的边界点上,常使上覆层呈单斜构造。若深部岩层直立,上覆水平叠层,在侧向挤压下,深部岩层并不发生层面滑动,往往表现为直立岩层中的弱层压偏,压偏物质上拱造成上覆叠层隆起。或深部层产生一组断裂,并切割成诸块体,在应力继续加大的情况下,块体上升,常使上覆层成背斜构造(如图版 145)。关于深层断裂构造对浅层的控制作用,也是深层对浅层控制的一种重要控制条件,在水平压

力下,深层断裂面的倾角以及断裂系所组成的几何图形,是控制浅层形变的重要条件。只从单条断裂看,它们对上覆叠层的形态控制均呈单斜构造。若深部断裂的活动方式以剪切作用为主的话,地表常形成明显的带状或雁行式褶皱构造,并可清楚看到受深层断裂控制的构造迹象。但在浅层中剪切带宽度的变化以及雁行式褶皱的平面排列组合形式,常受上覆叠层材料性质和厚度变化的影响。材料越厚在表层部分剪切带的宽度就越大,单个雁行式褶皱排列的角度与深层断裂走向间的夹角也大,若材料薄夹角就小。若材料强度越大,剪切带的宽度越窄,反之即宽,(参看图版 30, 37, 38)。

五、相变带的控制作用

由于深部岩相变化,造成与浅层水平叠层的不协调,因而在侧向挤压后,深层岩相差异部位,常是最易发生变形的部位,又因相变带的形式不同,如渐变带、突变带等,对上覆叠层的形变控制都不一样。渐变带常用渐变面的倾斜方向来确定上覆层的形变位置和形变特征。这时上覆层的背斜轴轴面倾斜方向与渐变面倾斜方向一致。若深层相变带为突变带,即直角相接的模型,当在侧向挤压下,其形变规律主要取决于材料性质的变化,一般情况界面两侧材料形变自成体系,但接触带位置常是最稳定的,参看图版 152, 153。

六、弧形构造与深层(即基底)构造运动的关系

弧形构造在地质构造中普遍存在,弧形构造的产生,从模拟实验角度考虑,主要形成条件受基底断块或断裂的控制。基底断块或断裂的形态以及组合形式、埋藏深度、上覆叠层的力学性质等,常决定弧形构造的分布形式。由块体相互错移而造成块间的弧形构造,其带状性强,以块间的距离为带的宽度,在平直块缘接界上部叠层形成的弧形构造呈雁列状,在块体位移前缘也呈明显弧形。若块体顶部均覆盖有叠层材料,这时块缘上部产生的雁列褶皱紧闭,块体位移前缘弧形平缓。弧形构造的形态往往由块体的形态而定。如有上覆叠层的块体向前推移时,块体顶部也可产生纵向褶皱,即为“山字型构造”的脊柱,但这主要是由边界条件所决定的,山字型的前后缘边界均为自由边界。当我们在实验中使前缘为自由边界,而后缘为限制边界时,则往往产生横向拉张断裂。我们认为这些都是弧形构造系中的伴生构造现象。若我们在推移块体的边缘,使其倾角变换时,即内倾或外倾,在块体的上覆叠层中或离开块体一侧的叠层材料,将产生不同形式的弧形构造。在一个由水平叠层组成的平面模型中,由于推挤速度的不均衡或两侧压力不平行,都可形成弧形构造。所以弧形构造的产生仍属材料或岩体在平面和垂向上的不均一而造成的(参看图版 159, 160, 165, 170)。

第四章 地堑或裂谷的实验研究

地堑或裂谷的力学成因以及物理模型,是当前大地构造学家,尤其是板块构造学家们所关注的问题。因而,关于地堑或裂谷的成因模式便产生了不少假说,如最早的拉张说与挤压说之争,其结果使拉张说占了上风。但现在又一致倾向于对地幔上涌说的支持。我们认为,根据不同地质背景和各种构造边界条件下,形成地堑或裂谷的可能性都会有,不能用固定的想法或观点进行分析。

为了叙述方便,我们在实验中根据“拉张型”、“挤压型”以及“地幔上涌”三种地堑形成的受力方式设计了实验模型,并选择了多种不同性质的材料进行实验。实验结果证实,地堑的形成主要是引张力造成的,但引起引张力的产生却有多种因素,从野外资料和模拟实验边界条件的变化来看,(1)在一地区完全的拉张作用下,地堑带内断裂面在垂向上的发展,多数是直的,断裂面平行分布于地堑带内,这在实验中主要采用了脆性材料,平面上锯齿状断裂不明显,这里也包括了断块拉张而造成块间的地堑系。(2)在大区域上,地壳因受挤压而形成大型隆起,隆起顶部由于局部张应力的产生,形成地堑构造。地堑内部断裂形式,多成对称内倾的“V”型地堑系,地堑断陷中间最深,与第一种情况一样,脆性材料时断面平直,若塑性加大时常呈锯齿状。地堑两侧边缘的断裂最发育,延伸也最深。实验结果表明,由于挤压上拱并由此卷入上拱模型的材料厚度,在同一部位上决定拱起幅度的大小,幅度大小往往又决定形成地堑的宽度。若材料性质相同,材料薄,幅度大,地堑的宽度小。若材料厚,幅度小,地堑的宽度就大。另外,在挤压应力作用下,由于断块的相互错移也可造成地堑构造。(3)由于上拱造成的地堑,在地质体中多表现为地幔物质上涌的结果,使其顶部产生张力作用,形成地堑。从模拟实验结果看,在相同尺寸的模型上,因上拱物质的幅度以及单位面积的大小不同,决定了模型顶部的张应力区的大小(即宽窄),张应力区的宽窄又决定了地堑的规模。

虽然我们在不同条件下进行的模拟实验都获得了地堑的几何形态特征,但是地堑构造的形变或演化过程,在几种不同边界条件下表现的却不一致。拉张力作用下产生的地堑可分为两种:表层地堑也就是由地表或实验模型顶部开始的地堑,伴随地堑产生的断裂在平面上呈锯齿状。在剖面上断裂常自上而下的发展,由于模型在垂向上是由不同强度的叠层组成,所以断裂在向深处延伸上,常受不同界面控制,使得断裂断续出现。地堑都在模型靠顶部部分产生。地堑的宽度也常受实验材料控制,材料强度大,地堑宽度就小,表面断裂延长呈不规则锯齿状。而材料强度低,地堑的宽度就大,断裂在平面上的表现多呈锯齿状。第二种情况则是由于基底断块的相互拉张作用使盖层产生地堑,这在地堑的生成形式中是最常见的,此种情况形成的地堑宽度,随基底断块拉开的程度而定,二者为正相关关系。地堑内部断裂的生成顺序常由底部,断块衔接部位开始,逐渐向顶部发展。地堑边缘的断裂延伸最深,由地堑截断的块体,在地堑的中心部位,一般较为稳定,甚至水平层在形变后仍保持完整呈整体下沉。另外,在水平挤压应力作用下,模型生成地堑

构造时也有两种情况：一种是在模型受水平挤压后，其中间部分首先发生隆起，当应力继续加大时，隆起顶部先产生引张断裂，并在剖面部分也产生引张断裂，平面部分的断裂在走向延伸上均呈锯齿状，剖面部分的断裂由上往下延伸，主断面往往产生在地堑带边缘，呈“V”字型，断距由上往下逐渐变小。另一种则是在水平挤压下，模型由中间向两端产生一系列的逆冲断层，造成模型两侧抬起，中间下陷，但这时下陷边缘的断裂，均为逆断层性质，断面向外倾斜，呈“Λ”字型，断裂的生成顺序由模型中间向两侧逐条发展，断裂越向外侧断距越大。平面上断裂表现为一系列平行排列的逆冲断层（图版 175, 181, 182, 183）。

另外，受上拱物质或垂直作用力形成地堑的过程，由于模型下部可塑性物质的上拱，使顶部材料产生拉张力而生成明显的地堑构造。但因上拱物质顶面与盖层接触的形态变化不同，地堑的规模与形态也不一样，若下部物质上涌呈尖顶状，这时在模型上部，地堑产生范围小，断裂由顶部产生并往下延伸，断陷的深度大，主要断裂都在地堑带的最外缘，在中间部分为由一些小断裂组成的小型地堑群。若模型下部物质以圆顶状上拱时，地堑生成过程同上，但地堑的宽度增大了。由于地堑宽度的增大，模型中间的成层材料，下陷时表现为参差不齐，若把上拱物质的顶面形态再予加宽时，地堑形式在模型中间部分即在模型上拱顶面表现的最宽，形变后期上拱体的最外缘常产生明显的逆断层，断裂的发展顺序从模型顶部即中间部分向两侧发展。根据上述我们所作模拟实验结果及野外现象观察，得到如下几点认识：

1. 通过模拟实验结果表明，造成地壳表层的拉张应力场，有四种受力状态：区域或局部挤压应力场造成地壳隆起，使表面产生拉张应力场。深部断块抬起或地幔上涌造成地壳隆起，使表层产生拉张应力场。受地球不平衡转动造成的断块与断块、地区与地区的拉张应力场。另外，上述受力状态也可以是相关联的复合状态，亦可同样造成拉张应力场。

2. 除拉张应力场可形成地堑构造外，挤压作用也可形成，不同的是地堑外缘的断层即边界断层呈反倾向，并呈逆断层性质，断层年龄越往外缘越新，最先产生的断裂延伸最深，地堑内部及其边缘具挤压型构造形变现象。

3. 由地幔上涌造成的地堑，其内部断裂的发展顺序，由顶部向下延伸，断距越向下越小，地堑中间部分破碎最厉害，地堑带边缘的断裂延伸最深，也最大，但在由不同性质叠层材料组成的模型中，断裂常受不连续介质层的控制，呈羽列状排列。另外，地幔上涌体的形态决定地堑的规模。

4. 受断块拉张作用产生的地堑，断裂常由深部开始，往上向左右分支呈“V”字型，从实验标本观察，当地堑形成过程中，中间材料明显下沉，顶部破碎程度简单，而底部复杂。