

# 鄂东南地区印支—燕山期区域构造变形的实验研究与动力学分析\*

黄定华

(中国地质大学地质系, 武汉)

(鄂东南地质队, 大冶)

**提 要:** 运用实验模拟和动力学分析相结合的研究方法, 对鄂东南地区印支—燕山期的区域构造特征及成因机理进行了整体尺度上的初步研究, 提出了部分与前人研究结果不尽一致的认识。以此为基础, 重建了该区三维控矿构造格架。

**主题词:** 鄂东南 构造变形 实验研究 动力学分析

鄂东南铜金多金属成矿区经历过多轮地质研究, 其中对区域构造更是包括了运用各种构造学说所作的解释。持不同观点者各持所见, 也各有所据, 给后来者具体分析构造因素的控矿作用带来了一些困难。在新一轮找矿研究中, 我们因此希望能运用某些有效的判别手段, 据以对前人成果作一个概略的全面的审视, 以澄清某些疑问, 找出进一步研究的突破口。本文中区域构造的实验研究与动力学分析, 即是为此而作的一种尝试性探索。我们的目标不是为了获得实验和理论研究结果与野外现象之间严格一一对应的描述, 而是希望能够准确地定性指明构造形变场的整体结构特征, 分析在不同层次、不同尺度和变形的不同阶段中, 有可能发育何种性质的构造, 而不可能出现何种构造。以建立起一个相对完整和有机关联的三维构造框架, 并就其给出合理的解释。我们还希望由此使不同观点的研究者能够用一种可操作的和比较合理的相同标准, 在感受相同物理实在时得到一个大致相近的认识。这样, 当我们在重新评价前人成果时: 主要不是从其流行程度和影响大小, 而是以其合理和可检验性来进行取舍, 使研究结果能逐步更加逼近真实的地质过程。

基于上述设想, 本文建立了鄂东南地区中生代构造变形的力学模型, 并对其进行了实验研究与动力学分析。下文即对这一探索的结果作一粗略的讨论。

## 1 鄂东南地区中生代区域构造力学模型与变形条件的确定

鄂东南地区位于扬子陆块中段, 北接大别地体, 南与华南板块毗邻。晋宁运动形成了本区结晶基底, 此后又相继经历了印支期、燕山期、四川期、太平洋期及喜马拉雅期等多次运

\* 本文系国家科技攻关项目85-901-03-01专题研究中的部分内容

\*\* 参加实验工作的还有湖北地质研究所杨志甫、费诚及中国地质大学李刚等  
黄定华, 男, 1952年生, 副教授, 从事区域地质的教学和科研工作, 邮政编码: 430074  
1993-9-29收稿, 1994-4-5修改回

动的改造<sup>①</sup>。其中印支运动奠定了区内盖层构造的基础。燕山运动的叠加则造就了一些特殊的控岩控矿构造。与这两期运动相比,此后的历次运动已不足以形成独立的构造成分,我们的探索也因此集中于这两期运动所导致的种种效应。根据前人研究共识,我们可以确定印支和燕山运动时的最基本的变形条件如下:

(1) 印支期鄂东南地区变形的初始条件: ①有一个刚性的结晶基底; ②由多层不同岩系所组成的水平、平直无变形盖层; ③受力条件为近南北向水平挤压; ④变形岩层在整体上可看作弹塑性体。

(2) 燕山期叠加变形的初始条件: ①已发育大量褶皱和断裂,因而力学条件(结构)趋于更加复杂的盖层岩系; ②岩浆热动力条件大为加强; ③因库拉板块向北和古欧亚大陆向南运动所派生的左行剪切效应成为本区变形的动力; ④由于褶皱,上部岩层抗弯能力增强(褶皱岩层可与波纹状防雨板相比,后者沿轴向的抗弯能力显然比相同材料的平板要大); 同时由于岩浆活动加强,下部岩层的刚度反而减小。

将上述条件进行综合,印支期与燕山期鄂东南地区构造的力学模型可示如图1。

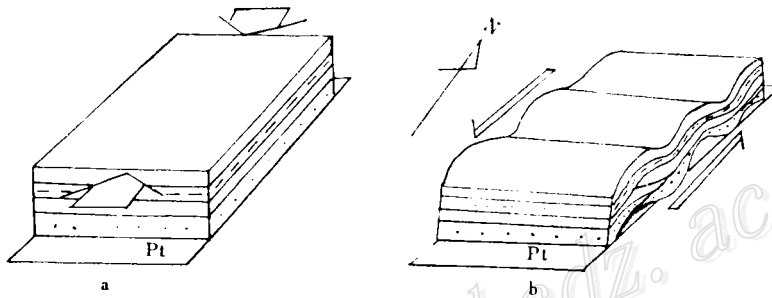


图1 鄂东南地区构造力学模型

a—印支期模型, b—燕山期模型

Fig. 1. Tectonic mechanics models of southeast Hubei.

a—Model of Indosinian period; b—Model of Yanshanian period.

据此确定实验模型如下:

(1) 四层结构薄板模型: 从研究区盖层岩系的岩性差异, 可将相应的实验模型定性地分为四层。从下往上依次为: ①震旦系—奥陶系; ②志留系; ③石炭系—下三叠统; ④中上三叠统。其中泥盆系在区内发育极为局限且很薄, 故不考虑; 由于前震旦系结晶基底刚度较大, 与盖层岩系的变形显著不同, 在实验中均以模板底座代替之。此外, 按前人对该区印支期应力场的共识, 变形时对模型施以南北向的水平挤压力。

(2) 双层结构模型: 初步实验表明: 在多层结构模型的变形过程中, 无论岩层力性如何, 总可以将其划分为上、下两套在性质上明显不同的变形单元。为突出这一规律, 可将多层模型进一步简化为双层模型, 来分析其沿垂向上变形的基本特征。

(3) 含先成褶皱与断裂的多层结构模型: 用以模拟和研究燕山期运动造成的叠加变形效应。同前理, 使模型东西两侧受到左旋剪切力而变形。

实验材料以红粘土, 亚砂土及亚粘土等分别参照前述①—④层岩性差异进行调配, 将模

① 万天丰等, 长江中下游铜金硫铁矿带构造演化、应力场研究与构造成矿预测。国家重点科技攻关项目75-55-02-01-B成果报告, 1990

型规格按研究区实际定为20:10:1~0.5。为找出一般规律、对上述材料按不同比例调制后重复进行了实验,结果发现实际变形在整体尺度上并不因材料的不同而有质的差异(详后)。

## 2 多层及双层模型的挤压变形分析

### 2.1 整体变形特征

无论多层或双层模型,在变形前期,上部岩系均以褶皱变形为主,下部则以低角度断裂的“垂向堆垛”为主。这是因为上部岩系在遭受水平挤压的同时还受到下部岩系(因压扁作用而增厚所产生)的垂向顶托,从而大为加强了褶皱发育的可能性;而相反地,下部岩系虽塑性更强,却因基底和上部岩系的夹持,缺乏褶皱变形所必需的空间条件,因此当应力超过其强度极限后首先产生的不是褶皱而是断裂。结果多层模型在整体上以上部褶皱比下部更为发育为特征,而这一点与传统认识是显然不同的。

在变形后期,岩层整体水平缩短超过某一临界值后,上、下部变形特征将颠倒过来,以上部断裂而下部褶皱为特征。但此时形成之断层和褶皱的几何学、运动学和动力学特征均与前期产物不同:

前期阶段一褶皱发育于上部,数量多,形态紧闭、复杂;断层发育于下部,以剖面X型共轭断裂系为基础,进而发育为近水平滑脱断层。

后期阶段一褶皱发育于下部,单个或数量极少,形态宽缓、简单;断层主要发育于上部,各种类型均有,但以走向和倾向断层为主。

### 2.2 变形前期分层变形特征(照片a—f)

上部岩系的变形:上部岩系在变形过程中同时遭受了纵弯与横弯褶皱作用(挤压加顶托)。起始阶段,随着压扁作用的增强,向上的顶托力亦逐渐增大,结果使首先失稳的部位褶皱越来越强。当上部岩系包括数层岩层时,褶皱总是首先从最上层开始,然后依次向下扩展。并且从平面上看,褶皱的发育也非同时和等距,首先失稳的部位总是靠近前后缘,然后间断地、突跳式地向中间部位转移。

下部岩系的变形:上部岩系的重力载荷在前期阶段中多与基底的顶托所产生的弯矩抵消,因此在变形前期下部岩系缺乏褶皱变形的必要条件。在这种特定的约束条件下,当水平挤压应力超过岩层的强度极限后,下部将首先产生剖面共轭断裂。重复实验的结果还表明:①断层往往优先出现于和上部岩系率先褶皱部位所对应的下方(照片d—f);②这一特征不因岩性的改变而改变。而当上部岩系显著地失稳褶皱以后,下部共轭断裂系也进一步演变为近水平的拆离断层,且被切割之断片也总是优先运移至该处,然后被后成断片铲起而发生垂向堆垛(即原为同一层的断片互相叠置成多层,如照片e、f所示)。

### 2.3 变形后期分层变形特征

岩层厚度、刚度与粘度等对多层模型变形的重要影响,在其对变形失稳时间及变形速率的控制。薄层状、低刚度和低粘性岩层往往率先失稳,其变形速率也较其它岩性层高。当其处于上部岩系顶端时(如区内三叠系),在弹性变形阶段即开始失稳褶皱,且其褶皱过程一直延续到塑性变形阶段以后。在这种情况下,顶部薄层先形成低峰值、小波长之密集褶皱群(在弹性范围内),进而形成高峰值、大波长的褶皱组合(在塑性范围内)。前期形成死褶后

再与下伏岩系一同褶皱,结果从整体上该层与下伏岩系的变形可看作是协调的,但任一局部都显示为不协调的。另一方面,根据褶皱发育的主波长理论,在线性变形范围内(变形 $<15\%$ ),褶皱主波长的形成仅与层厚及粘性差有关,在一级近似范围内更主要地与层厚有关。因此在失稳起褶的初始阶段,多层模型的上部还可进一步分出数层主波长不同的变形单元。在变形进入非线性阶段后,已形成之主波长将进一步发展,从而造成普遍发育的层内褶皱,其形态各层不一。最后,各层间的形态均是“大同而小异”,可称为“准协调”褶皱层。另一方面,随着变形的递进发展,上部岩系中首先发育的断层极可能是背斜核部的纵张节理系演化而来者(照片b—e),它与上部岩系的褶皱相似,也是自上而下扩展的。这与传统认识中首先出现在褶皱倒转翼的逆断层截然不同,究其原因,背斜核部为局部拉张环境,岩石抗拉强度又远小于其抗剪和抗压强度,同时上部比下部更显脆性域特征,所以在背斜曲率最大、应力亦最集中的核部率先发生断裂。这类断层在后期有部分被破坏,部分则进一步改造成逆断层。与其它成因的断层相比,它们延深较大而多发展为贯通上下各层的断裂系统。

褶皱翼部所发育的走向逆断层多由层间滑脱断层进一步扩展而成。它们起于剖面共轭断裂系而止于层间滑脱系,两者最终合为一体。无论其前锋带(剖面共轭系)产状陡缓与否,一俟过渡到层间滑脱系后,产状即迅速减缓至水平。这类断层一般较少切过不同岩性层或前述次级协调层,因此与深部的贯通性也低于前述的断层系统。

### 3 叠加变形分析

#### 3.1 上部岩系中的变形

与叠加前相比,顶部岩层因其压扁程度甚微而褶皱较强,故其若展平后的岩层长度已大于其余各下伏岩层,这成为在该层位形成叠加褶皱的重要前提。在受到力偶场的叠加剪切作用时,因沿四边形对角线方向位移最大,故它将沿此方向被拉紧绷起,形成一种特殊成因的“拉伸褶皱”(照片g),其成因类似于将毛巾拉紧绷直或将笛膜贴紧于竹笛上所形成的拉伸皱纹。实验发现这种叠加褶皱多横跨于先成向斜核部之上而终止于相邻两背斜之间,卷入褶皱的地层只限于顶层岩系,且其组合方式以左行雁列为特征。这些都使之与经典的跨轴叠加褶皱<sup>[9]</sup>相区别。

除顶层在此阶段可叠加产生部分“拉伸”褶皱外,在上部岩系中此时已难以普遍发育真正的跨轴叠加褶皱。这是因为,前一阶段南北向挤压产生了轴向近东西的褶皱组合,它们将多层平直板状结构改造成波纹状“防雨板”式结构,这使之抵抗沿其轴向的弯曲强度大为增加。但对于断裂作用而言,无论岩层中有无褶皱,都不会导致其变形临界应力的改变,因此在本文叠加变形时更易于在上部岩系中发育相应的、走向北西的左行雁列式张剪性断裂系。

#### 3.2 下部岩系中的变形

在与上部近于一致的边界条件下,下部岩系中优先发育的构造亦是左行雁列断层。同时,由于在实际情况中,大规模岩浆活动业已开始,这样不仅岩浆的顶托有助于诱发局部横弯褶皱效应,同时岩浆热动力对下部岩层的烘烤也将部分降低其刚度而增强其塑性,从而大为减低了叠加褶皱所需的应变能。按研究区实际将模型的长度(沿东西方向)与宽度(沿南

北方向)定为2:1时,理论计算<sup>[1]</sup>和实验均显示出在如上约束时,将在模型中部产生拱形向上的微弱单弧褶皱,可称之为中央(隐伏)背斜(照片g)。其实际发育过程是由一点起始而迅速波及至模型的另一端。这一褶皱作用与前述各种褶皱的一个不同之处是,它的形成与扩展方向是自下而上的,故最终在地表不一定能显示出来。同时其变形只能维持在线性范围之内,在未达比例极限之前,隐伏背斜核部即开始产生纵张断裂系,后者逐渐扩张而贯通模型的上、下部并增大其走向长度,同时也使隐伏褶皱的变形难以为继。

#### 4 部分其它构造的实验观测与讨论

北北东向构造:在燕山期的左行力偶场中,按应力分析,理应出现的北北东向褶皱应作右行排列,而不是如研究区和实验显示的左行排列(图2)。后者已如前述,被证明是仅发育于模型顶部岩系中、局限于两先成背斜之间的一种“拉伸”褶皱,与一般意义的跨轴叠加

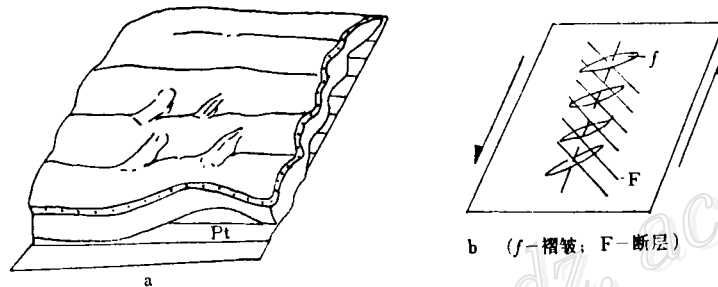


图2 叠加变形实验图形及应力分析

a—素描图; b—分析图

Fig. 2. Superimposed deformation diagram and stress analysis.

a—Sketch; b—Analytical diagram.

褶皱并非同一成因。事实上,在已有先成褶皱的基础上,再次因叠加变形而形成在区域尺度上普遍发育的叠加褶皱,是十分困难的,在浅层次盖层变形中尤其如此。

另一方面,在此力偶场中,除了优先发育北西向断裂外,虽然在北北东向褶皱核部也可因纵张裂隙的进一步贯通,而出现少量次级北北东向断裂,一般不应有大规模的(如研究区所见)、独立于褶皱成因的北北东向断裂。除非已有先成断裂存在,才能在此时被改造为压剪性断裂而再次活动。在多层模型的挤压实验中,发现在近东西向(实际为北西西向)褶皱出现之前,先有北东和北西向共轭裂隙发育;褶皱形成之后,还有少量横切其轴向的北北东向横张断裂生成。后者正是过去被看作燕山期产物者,实际上是形成于印支晚期,而改造和再活动于燕山运动时。与发育于褶皱核部的北北东向次级断裂相比,它主要呈压剪性,因此与前人认识不同:它并不有利于导矿和容矿。

表层滑覆构造:对实验模型施以压剪性变形过程中,在表层可以发现一种规模小而密集的近水平叠覆断片(照片h),在张文佑先生的研究中<sup>[2]</sup>曾称其为鳞片构造,实际上它有可能就是在研究区已发现的表层滑覆构造。这种构造发育于挤压后期向剪切转换阶段,其成因包括地形改变诱导出的重力滑动、以及因碰撞而出现的“刹车”效应等。这种展布于表层的

特殊断裂系统不仅覆盖了发育于其以前的断裂，也阻断了后期各类断裂向地表扩展的趋势，最终使研究区地表呈现出一套与地下特征迥然不同的构造景观。

## 5 鄂东南地区三维控矿格架及其控矿作用特征

晋宁运动以后，至中生代始，研究区方再次发生强烈构造变形。其中印支期变形的主体成分，是近地表盖层岩系中大规模的近东西向褶皱，以及盖层下部近水平产状的滑脱断层。在其之前，已有由北东、北西向断裂组成的平面共轭系；在此之后，则陆续产生了一组北北东向的横张断裂。印支末时，褶皱已扩展至盖层下部的岩系中，深部滑脱已造成褶皱强烈区下方的断片垂向堆垛，后者进一步加剧了其上方褶皱系的隆起。褶皱高度变形的结果又使其核部出现断裂，随着挤压强化，褶皱被推倒至倒转，核部断层发展为逆冲推覆断层。之后由于陆块之间碰撞引起的“刹车”效应与重力作用相耦合，使表层形成一系列近水平、小位移的滑覆构造系统。燕山运动伊始，区内三叠系中首先出现部分规模虽小却于成矿有利的北北东向“拉伸”背斜，稍后在盖层的中深层部位又普遍发育了一组北西向张剪性断层系统，同时北北东向断裂转为压剪性平移断层再次活动。在岩浆作用的影响参与下，盖层岩系的下部靠中央部分出现贯通全区南北的中央隐伏隆起。此后随着该隆起的破裂变形，构造渐趋于平静（而岩浆活动则达到高潮），控矿构造格架随之定型，形成一套由三层（表层、中部和下部）四套断裂（表层滑覆、中部推覆与剪切、深部滑脱）与三层三套褶皱（表层“拉伸”、中部纵张和深部隐伏隆起）共同组成的控矿网络（图3）。

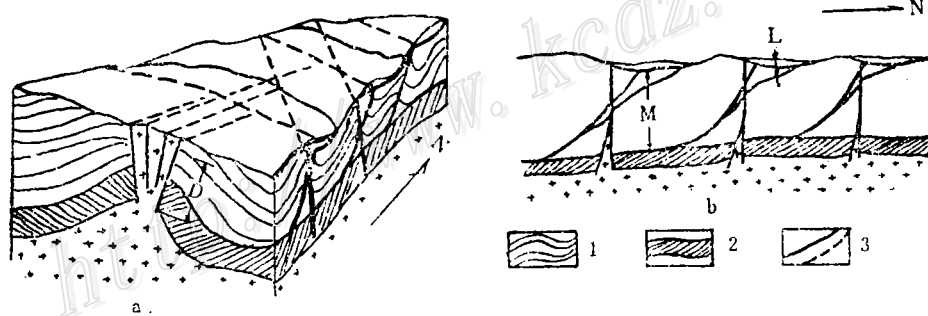


图3 鄂东南区域控矿构造模型

a—立体图；b—剖面图

1—盖层岩系；2—基底岩系；3—断层及隐伏断层

L—表层滑覆带；M—浅-中层剪切-推覆带；D—中-深部隐伏隆起及纵张断裂带

Fig. 3. Regional ore-control tectonic model of southeast Hubei.

a—Stereogram; b—Section; 1—Cap rock; 2—Basement; 3—Fault and concealed fault.

L—Surface sliding-capping zone; M—Shallow-medium depth shear-nappe zone;

D—Medium-deep concealed uplift and longitudinal tensional fractural zone.

这一区域构造格架的控矿作用主要表现为各种褶皱、断裂与深部的连通性问题，说明如下：

(1) 褶皱与区域性岩浆活动通道的关系

在上述格架中，可以看出同层位褶皱互不相通，不同层位的褶皱则互相错位。亦即“左

右封闭,上下错开”。仅叠加变形的结果使中央隐伏背斜展布区的连通状况有所改善。因此就褶皱组合而言,其上下层间的通道是否畅通,要根据各种尺度断裂的发育而定。对一级褶皱而言,由于其发育是“半波”状的,即向斜迁就背斜。故向斜与深部较难沟通。但同级背斜的核部多为虚脱部位,从而可接纳从侧方贯入的含矿岩浆流体。另一方面,中央隐伏背斜不仅改善了部分东西向褶皱的连通性,其自身就是与深部沟通的最好通道。因此成矿时将通过它把岩浆导入部分东西向的印支褶皱内。偏离中央较远的东西向褶皱主要靠各种断层来贯通,其中尤以发育于早期背斜核部的逆冲断层和各层次中褶皱核部的扇形张节理更为重要。两者的串连往往使岩浆沿着之字形路径流动侵入,成为区内“三层楼”式矿床发育的重要影响因素之一。鄂东南区岩体分布若以中央隐伏背斜为对称轴,其两侧岩体呈大致对称景观;从南到北,岩体均集中于三个近东西向一级背斜附近,这些都似可作为上述分析的佐证。

### (2) 区域性断层与岩浆活动通道的关系

燕山期最主要的张性断裂是盖层深部隐伏隆起核部的纵张断裂及中浅部的北西向断裂。其倾角多近于直立,是沟通上下层褶皱间通道的重要构造,自身也是良好的岩浆运移和停积场所。而印支期的北西西向逆冲断层,在燕山期力偶场中,亦可部分活化且转为张剪性或正断层,当其邻近早期背斜时,即可能成为大规模的岩浆-成矿通道。此时岩浆多定位于断层下盘,为表层滑覆体覆盖。当此后因剥蚀使之由北向南退缩时,岩体即暴露于地表。如区内毛铺-两剑桥断裂及其间的阮宜湾岩体等,便是一个典型的例证。

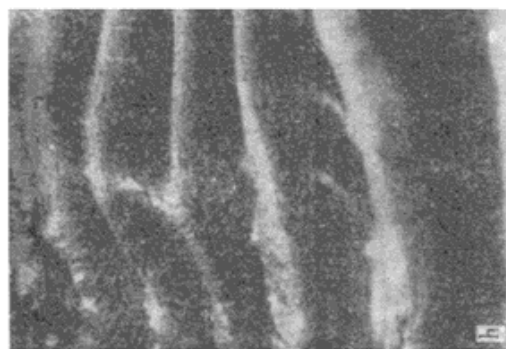
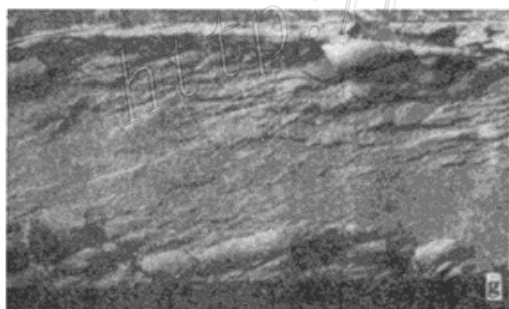
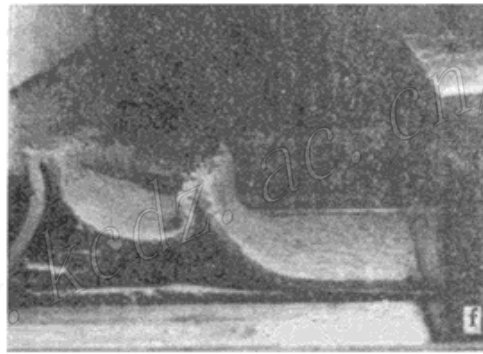
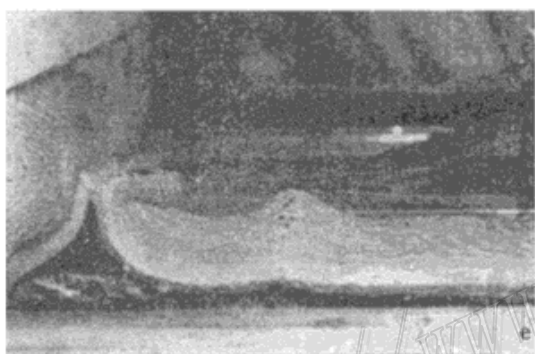
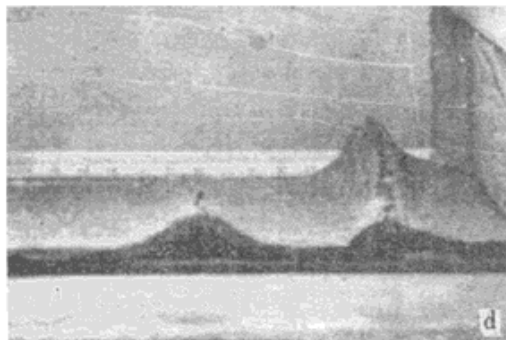
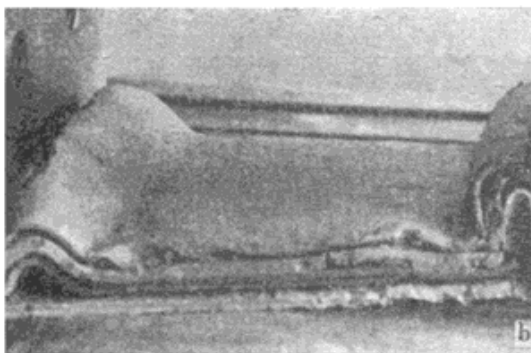
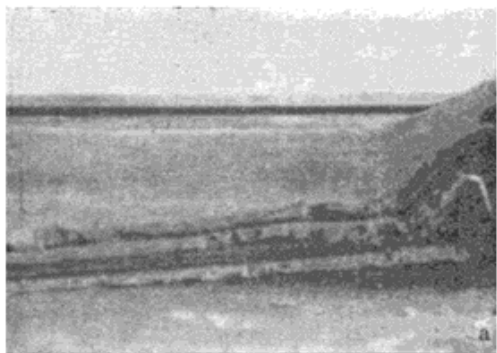
本文工作承蒙中国地质大学叶俊林教授和湖北省地矿局薛迪康副总工程师悉心指导,中科院院士常印佛总工程师建议成文。文稿又经三位审阅并提出宝贵修改意见,特致深切谢忱!

### 照片说明

a-c. 多层模型挤压实验: a. 示变形初期, 上部岩系一端开始褶皱; b. 示中间阶段, 上部另一端出现褶皱, 下部开始出现剖面共轭断裂; c. 示后期阶段, 褶皱跳回至另一端发育, 下部除已发生断片的垂向堆垛外, 也开始出现褶皱。注意到上部岩系中的断裂以背斜转折端的纵张裂隙为主。d-f. 双层模型挤压实验: d. 示变形初期, 上层以褶皱为主, 下层岩系(靠近褶皱处)出现近水平逆冲断层; e. 示中期阶段, 上层强烈褶皱, 下层不断出现断片的垂向堆垛(已见3层); f. 示后期阶段, 上部岩层褶皱与核部纵张断裂并存, 下层断片堆垛已见4层; g. 叠加剪切。表层岩系中先成向斜核部出现拉伸褶皱, 呈左行排列; 由下向上则发育了一中央隐伏隆起(背斜), 照片上方较清晰; h. 压-剪转换过程中出现的表层“鳞片”状构造, 进一步发育即成为表层滑覆体。

### 参 考 文 献

- 1 梁炳文, 胡世光. 弹塑性稳定理论. 北京: 国防工业出版社, 1983. 159~165
- 2 张文佑, 钟嘉猷, 单加增等. 构造物理模拟实验图册. 北京: 科学出版社, 1985. 17~18
- 3 Ramsay J G. Folding and fracturing of rocks. New York: McGraw-Hill, 1967. 162~166





## EXPERIMENTAL STUDY AND DYNAMIC ANALYSIS OF INDOSINIAN-YANSHANIAN REGIONAL TECTONIC DEFORMATION IN SOUTHEAST HUBEI

Huang Dinghua

(*Department of Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

Zhang Guosheng

(*Geological Party of Southeast Hubei, Daye*)<sup>1</sup>

**Key words:** Southeast Hubei, tectonic deformation, experimental study, dynamic analysis

### Abstract

Using a composite research method that combines deformation modelling with dynamic analysis, the authors made a preliminary and integrated study on the regional tectonic characteristics and genetic mechanism of southeast Hubei in Indosinian-Yanshanian periods. As a result, some new understanding has been reached that is quite different from the tectonic theories advanced by previous researchers. On such a basis, a three-dimensional ore-control tectonic framework is put forward in this paper. The ore-control network is composed jointly of three beds (surface, medium-depth and lower parts), four sets of fractures (surface sliding-capping, medium-depth nappe and shear, deep detachment) and three suites of folds (surface "extension", medium-depth longitudinal tension and deep concealed uplifting).

---

### 欢迎订阅1994年《矿床地质》增刊

为迎接全国第二届矿田构造学术会议的召开，《矿床地质》特出版1994年增刊1期。增刊收集有关成矿与构造方面的论文62篇。论文反映了近年来矿田构造与成矿方面的最新研究成果，代表了我国矿田构造的研究现状。

该增刊共128页，约20万字，定价5元。国内外公开发行。该增刊不随邮局发行，欲购者请与矿床地质研究所发行组联系。地址：北京百万庄路26号，邮政编码：100037。