

几种构造变形体的光弹性模拟实验研究

馬 瑾 鍾 嘉 猷

用光测弹性学方法研究地质构造,时间并不久。在苏联,М.В. 格佐夫斯基等人曾应用这种方法研究了一些横弯曲褶皱区及简单剪切应力作用区的应力分布情况^[1,2]。并且在实验中他们除用光弹性的材料外,还应用了光塑性的材料^[3,4],在美国, J. B. 居里等人也曾运用光弹性方法进行了纵弯曲褶皱中应力分布及硬岩层在纵弯曲褶皱中的作用等项研究^[5]。在我国,这项工作刚刚开始,仅少数研究单位做过少量的试验。

本文作者在研究了有关的相似材料之后,用这些材料对几种典型的变形体,即横弯曲褶皱,纵弯曲褶皱及简单剪切变形的应力分布,初步地作了较系统的研究。除部分与前述国外作者的工作类似外,还得到了一些新的结果。特介绍于此,敬希指正。

一、关于实验材料的性质

为了对比具有不同力学性质的材料在同样受载变形下应力分布的不同,在实验中,我们共采用了四种材料。它们均由明胶、甘油与水配制而成,但明胶、甘油与水的比例分别为: 1)25:40:35; 2)20:40:40; 3)15:45:40; 4)10:45:45 (以下分别称为25%明胶冻, 20%明胶冻, 15%明胶冻, 10%明胶冻)。

图1(1)表明了这四种材料在单轴压缩的情况下,应力与相对变形的关系。可以看到,在这些材料中,应力与相对变形的关系并不是直线关系。其中应变表现了滞后的现象。因此它们不是虎克体,而属于粘弹性体[凯尔文(Kelvin)体]。这种物体在加载荷后,除产生瞬时变形 ε_1 外,在一定的时间过程中,还逐渐产生滞后变形 ε_2 。卸载后,除瞬时弹性变形 ε_1 立刻恢复外, ε_2 并不能立刻恢复,而是逐渐恢复的(图2)。因为没有剩余变形,所以它还是属于弹性体的范畴。

总变形 ε 由 ε_1 与 ε_2 组成,应力 σ 与应变 ε 关系为:

$$\sigma = E' \varepsilon$$

其中

$$E' = E_1 + E_2$$

式中, E_1 为瞬时弹性模量, E_2 为滞后弹性模量。

图1(2)、(3)分别说明了 E' 值与应力 σ 及总变形 ε 的关系。由图可见, E' 是个变数:随着应力与应变的增大, E' 值也随着相对增大。10%明胶冻的 E' 值由200厘米²/克开

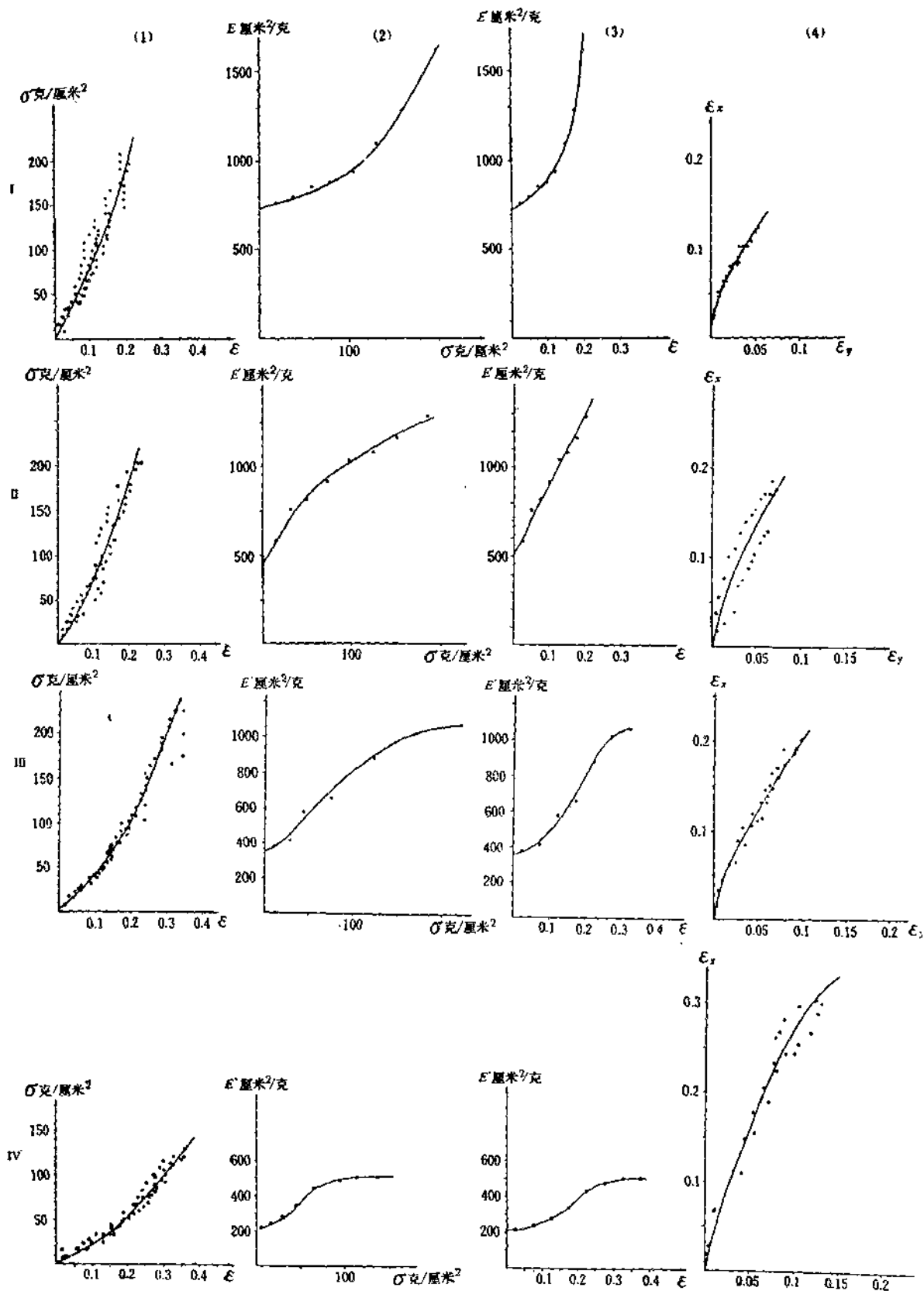


图 1 (1)应力 σ 与相对变形 ϵ 的关系, (2)弹性模量 E' 与应力 σ 的关系, (3)弹性模量 E' 与相对变形 ϵ 的关系, (4)轴向变形 ϵ_x 与侧向变形 ϵ_y 的关系
I 25% 的明胶冻, II 20% 的明胶冻, III 15% 的明胶冻, IV 10% 的明胶冻
(所有数据在室温 15°C 的条件下测得)

始逐渐增加,在应力为 120 克/厘米²,相对变形达到 0.35 时, E' 值趋于平稳 ($E'=500$ 厘米²/克)。随应力值增至 200 克/厘米²,15% 的明胶冻的 E' 值由 350 厘米²/克增至 1,050 厘米²/克;20% 明胶冻的 E' 值由 500 厘米²/克增至 1,300 厘米²/克;而 25% 的明胶冻 E' 值由 700 厘米²/克增至 1,600 厘米²/克。

后三种材料的 E' 值均未达到平稳值。总的看来,材料中明胶含量愈少,材料的 E' 值就愈小,那么,在同样的应力作用下,产生的变形就愈大;此外,材料中明胶含量愈小,则 E' 值随应力应变变化的速率也愈小,反之则愈大。

此外,我们研究了轴向变形与侧向变形的关系,并根据这个关系,近似地得到了这些材料的泊桑比(图 1 (4))。

为了确定模型中干涉色序数与应力和变形的关系,我们研究了由这四种材料做成的 $2 \times 3 \times 5$ 厘米³ 的标本在单轴压缩下的情况(图 3 (1),(2))。我们知道:

$$\Delta n = \frac{R}{d} \cdot 10^{-7}$$

式中, Δn ——重折射率, R ——光程差, d ——标本厚度。 R 值可用仪器精确测出,也可根据标本中产生的干涉色序数查表近似地得到。标本厚度为 2 厘米。因此重折射率 Δn 即可求出。由图 3 (1) 可见,最大剪切应力值 $\tau_{\max}$ 与 Δn 存在着近似线性的关系:

$$\tau_{\max} \approx \frac{\Delta n}{C_r}$$

这里 $\tau_{\max}$ ——标本中产生的最大剪切应力值。

C_r ——应力光学常数。

材料中明胶含量愈少 C_r 值愈大,即同样的剪切应力在其中引起的干涉色序数愈高。但应注意:在这些曲线中,在 τ 值最高时,点子均相对直线向右偏离。图 3 (2) 表示了相对应应变 ε 与重折射率 Δn 的线性关系,其关系式为

$$\varepsilon = \frac{\Delta n}{C_e}$$

其中 C_e ——应变光学常数。这里我们见到材料中明胶含量愈少, C_e 则愈小。这就是说,明胶含量愈少,同样的应变引起的干涉色序数愈低。

这样,明胶冻的 $\Delta n(\varepsilon)$ 曲线比 $\Delta n(\tau)$ 曲线具有较好的直线关系,此外,在实验中,当引起明胶模型变形的载荷去除而该材料的变形还未消失时,干涉色也不消失。由此看来,明胶冻的干涉色是直接由变形引起的,而不是由造成该变形的应力引起的。D. H. 奥索金娜在研究明胶的性质时也曾得到类似的结果^[3]。

明胶冻能产生较高的干涉色序数,并能造成与构造变形体几何上相似的变形,因此它比一般机械研究中常用的光弹性材料好。对于变形速度较快的情况来说,它在物理上是

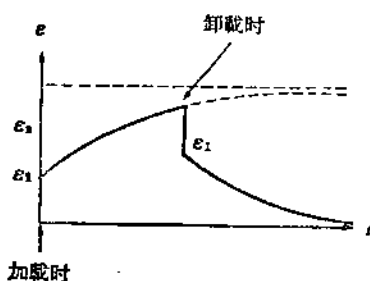


图 2 粘弹性体(凯尔文体)的变形曲线示意图

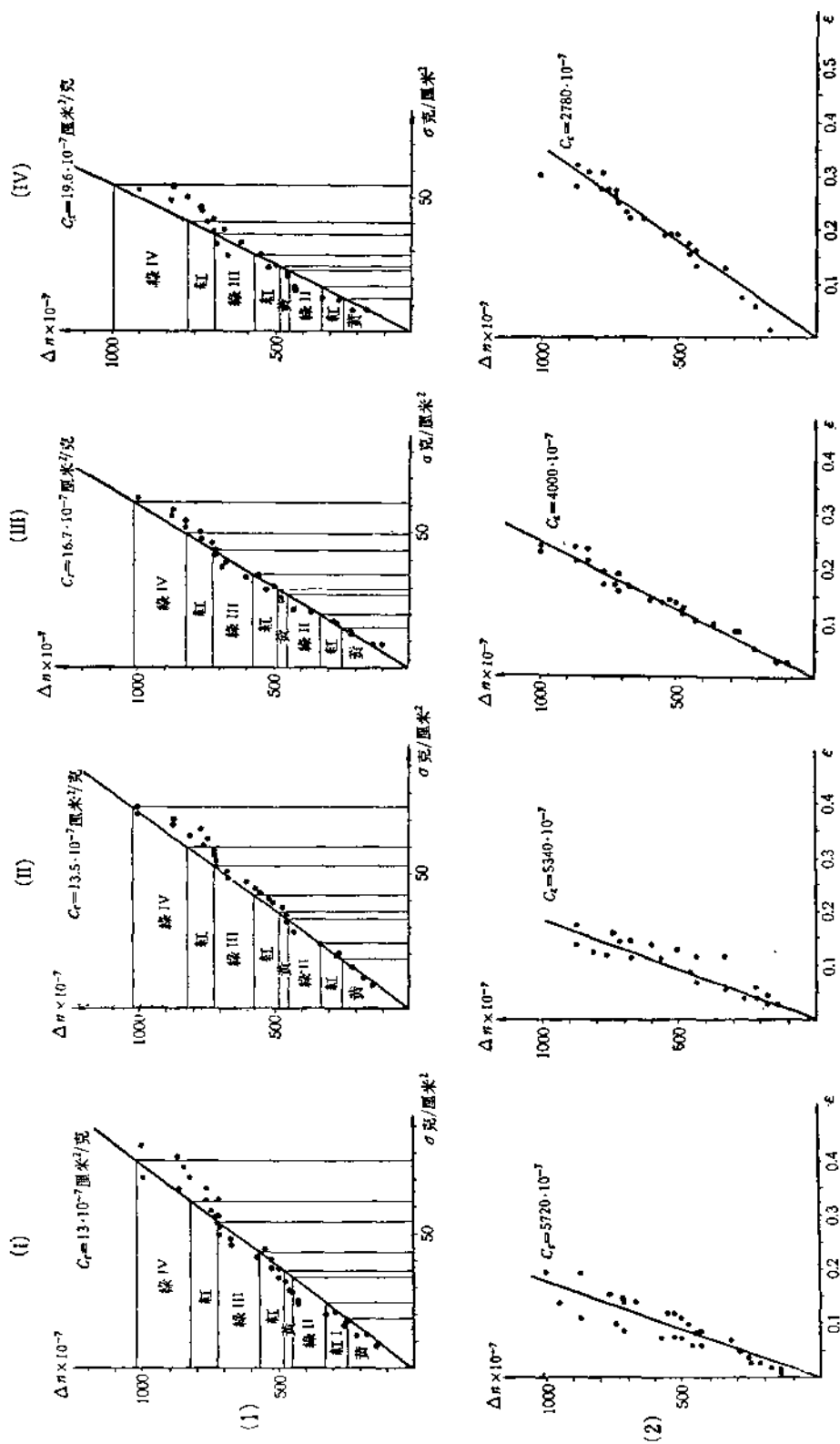


图3 (1)重折射率 Δn 与剪切应力 τ 的关系、(2)重折射率 Δn 与相对变形 ϵ 的关系
I 25%的明胶冻, II 20%的明胶冻, III 15%的明胶冻, IV 10%的明胶冻。(所有数据在室温 15°C 的条件下测得)

相似的。但是,这里所能研究的仅仅是应力与应变的关系,而对变形速度这一个在地质上极为重要的因素还不能考虑。因此,对于模拟长期的地质体变形问题来说,这种材料还不是理想的。

二、简单剪切应力作用区的应力分布情况

简单剪切变形¹⁾是地壳变形中最常见最普通的形式之一:横弯褶皱(由于基底断块垂直运动在岩层中引起的褶皱)翼部就是一个类似简单剪切的变形条件;同样,在剪切断裂带附近也构成了这种变形条件。

我们利用20%的明胶冻和10%的明胶冻研究了类似简单剪切变形时的应力情况(见图4)。图4中(一)、(三)分别表明20%及10%的明胶冻在附加侧向张力的条件下,遭受左型简单剪切时的剪应力分布,主应力轨道(说明标本中各点最大主应力与最小主应力方向的线)及剪应力轨道(说明标本中各点最大剪应力作用的方向线)的情况^[1,2]。图4中(二)、(四)分别表明它们在附加侧向压力的条件下,遭受简单剪切时的剪应力分布、主应力轨道及剪应力轨道的情况。

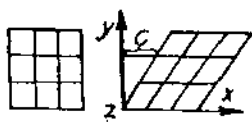
由图4我们可以见到,剪应力最大值位于大小相等方向相反的力偶作用区。剪应力值向两侧逐渐减小。在附加侧向张力时的剪应力值,大于在附加侧向压力条件下的剪应力值。此外,材料的 E' 值越高,引起同样变形所需的应力值也愈高。

从主应力轨道看,在附加侧向张力的条件下,最小主应力轨道(压力方向) σ_2 较趋近力偶作用方向,而最大主应力轨道(张力方向) σ_1 则与力偶作用方向横交。在最大主应力 σ_1 的值大于材料的抗张强度 P_0 时,可以在力偶作用区产生羽状的张裂隙。这种张裂隙应平行最小主应力轨道 σ_2 ,而与力偶作用方向构成小于 45° 的锐角。在附加侧向压应力的条件下,最大主应力轨道 σ_1 趋近力偶作用方向,而最小主应力轨道 σ_2 则与力偶作用方向横交。因此在最大主应力 σ_1 之值大于材料的抗张强度 P_0 时产生的羽状张裂隙,应与力偶作用方向构成大于 45° 的锐角。这样,当我们在野外看到羽状张裂隙时,可以根据它与力偶作用方向的关系来判断其形成的条件。

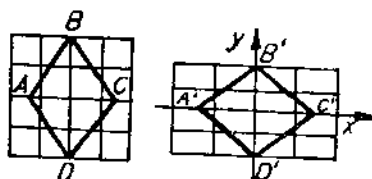
从剪应力轨道看,在附加侧向张力的条件下,右型(面对剪切面相对剪切位移向右)最

- 1) 简单剪切变形指的是,变形体质点在直角坐标系中平行 X 轴的方向位移,而位移的距离与该质点的 y 值成比例,这种变形称简单剪切。在这种情况下所有平行 XY 的平面在 X 方向滑动,而不改变它们与 XZ 面的距离。位移的大小与这些面离 XZ 面的距离成比例。

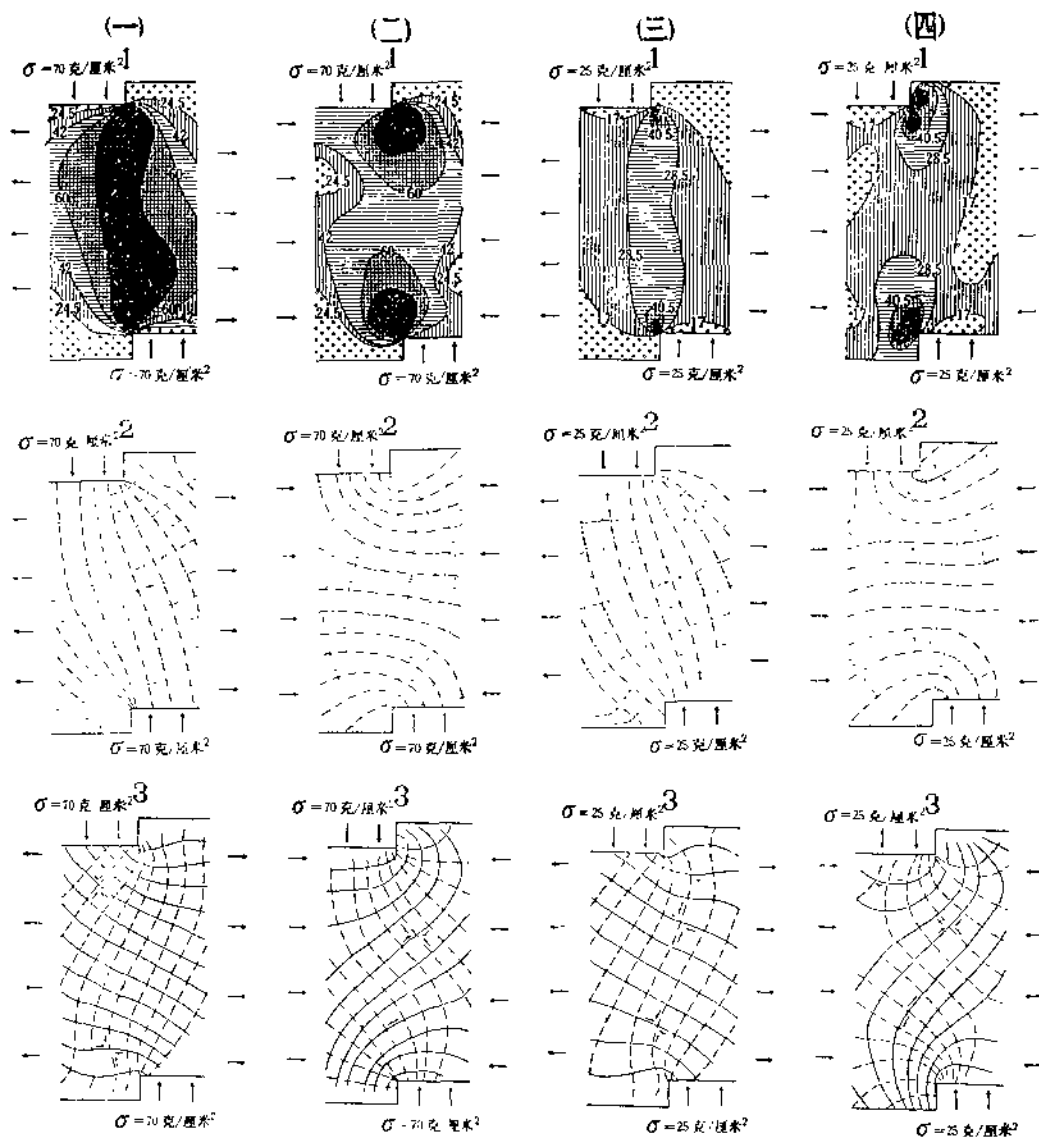
这里也应指出纯剪切变形是指在相互垂直方向上有大小相等、符号相反的变形,而变形后体积不变,如有图在 $A'C'$ 方面是拉伸变形,在 $B'D'$ 方向为压缩变形,详见A.纳达依(Nadai)的著作^[6]。



注图 1 简单剪切示意图



注图 2 纯剪切示意图



与应力值相应的干涉色图表

I 明胶含量 25%		II 明胶含量 20%		干涉色	符号	III 明胶含量 15%		IV 明胶含量 10%	
τ / cm ²	τ_{rel} 相对值	τ / cm ²	τ_{rel} 相对值			τ / cm ²	τ_{rel} 相对值	τ / cm ²	τ_{rel} 相对值
18.5	0.755	18.5	0.755	I 黄		15	0.75	12	0.7
24.5	1.0	24.5	1.0	II 绿		20	1.0	17	1.0
34	1.388	33	1.345	III 蓝		27.5	1.375	23	1.35
36	1.47	36	1.47	IV 紫		29.5	1.48	24.5	1.44
43	1.755	42	1.715	V 紫		35	1.75	36	1.7
54.5	2.22	53	2.16	VI 黑		43.5	2.18	38.5	2.1
62	2.53	60	2.45	VII 黑		49.5	2.47	40.5	2.38
77	3.1	75	3.05	VIII 黑		61	3.05	54.5	3.2
90	3.68	90	3.68	IX 黑		73.5	3.67	65.5	3.85

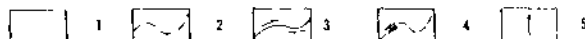


图 4 简单剪切应力作用区
1— σ_1 的轨迹；2— σ_2 的轨迹；3—右型最大剪切应力轨迹；4—左型最大剪切应力轨迹；
5—力的作用方向。(一)、(二)为 10 % 的明胶冻，(三)、(四)为 20 % 的明胶冻。

大剪应力轨道向右斜,而左型(面对剪切面相对剪切位移向左)的最大剪应力轨道向左斜(图4(一)、(三))。在附加侧向压力的条件下,右型最大剪应力轨道向左斜,而左型最大剪应力轨道向右斜(图4(二)、(四))。在剪应力值大于材料的抗剪强度 P_s 时,就可以产生羽状的左型(或右型)的剪切裂隙。这里考虑到材料抗剪强度 P_s 与剪应力作用时间长短的关系^[9],可以认为,在左型简单剪切变形区中,当附加侧向张力时,易于产生向左斜的左型剪切裂隙(正断层型);在附加侧向压应力时,易于产生向右斜的左型剪切裂隙(逆断层型)(图4(一)、(三))。在右型简单剪切变形区,当附加侧向张应力时,易于产生向右斜的右型剪切裂隙(正断层型);而在附加侧向压应力时,易于产生向左斜的右型剪切裂隙(逆断层型)。这样,从剖面图上看,在附加侧向压力时,产生的是羽状逆断层系。因此,观察野外羽状剪切裂隙的情况,可以帮助我们判断裂隙产生的条件。顺便指出,在简单剪切变形区,随着侧向附加压力的加大,所有裂隙发生与力偶方向相同的偏离。在左型简单剪切变形区,当侧压力加大时,裂隙面向左(逆时针)偏离;在右型简单剪切变形区,当压力加大时,裂隙面向右(顺时针)偏离。

三、横弯曲褶皱中应力分布状况

在自然界中,横弯曲褶皱(即反映基底断块垂直运动的褶皱)也是普遍存在的一种变形形式。在地台区的盖层褶皱中,很多学者都曾指出过这类褶皱的存在。本文前一作者在西天山也曾研究过一些中生代盖层中的此类褶皱。

这里作者采用了10%,15%,20%及25%的明胶冻作为实验的材料。标本厚度选为6厘米。压模宽度有5厘米,8厘米及15厘米三种,也就是说有小于标本厚度的、略大于标本厚度的和大大超过标本厚度的三种类型。

1. 剪应力分布情况

明胶冻标本在压模作用下产生变形,在双偏光镜下产生了彩色条纹(图版I-a)。这些彩色条纹说明了不同剪应力带的分布情况^[7,8]。

在25%及20%的明胶冻中(图5-I₁, 5-II₁),当压模宽度为5厘米时,即相当基底断块的宽度小于上复岩层厚度时,有三个最大剪应力分布区。第一个最大值分布在褶皱翼部压模端点两外侧,最大剪应力值达到90克/厘米²。在压模上背斜顶部有第二个最大剪应力值分布区,剪应力值为前者的一半,即为40克/厘米²,它的宽度与压模宽度大致相同。这两个最大剪应力值分布区往往合成一个统一的区域。在这区域外,有时还有第三个最大剪应力值分布区,它们位于褶皱翼部压模外侧的标本上部。两者间距约等于压模宽度的三倍,其剪应力值约为第一个最大剪应力值的四分之一(约为20克/厘米²)。在压模宽度略大于标本厚度时(图5-I₂, 5-II₂),第三个最大剪应力值分布区有时则不出现。当压模宽度大大超过标本厚度时,褶皱翼部压模两外侧的第一最大剪应力值分布区分隔成两个单独的区域。同时标本顶部的第二个最大剪应力值作用区也分成两个,各位于压

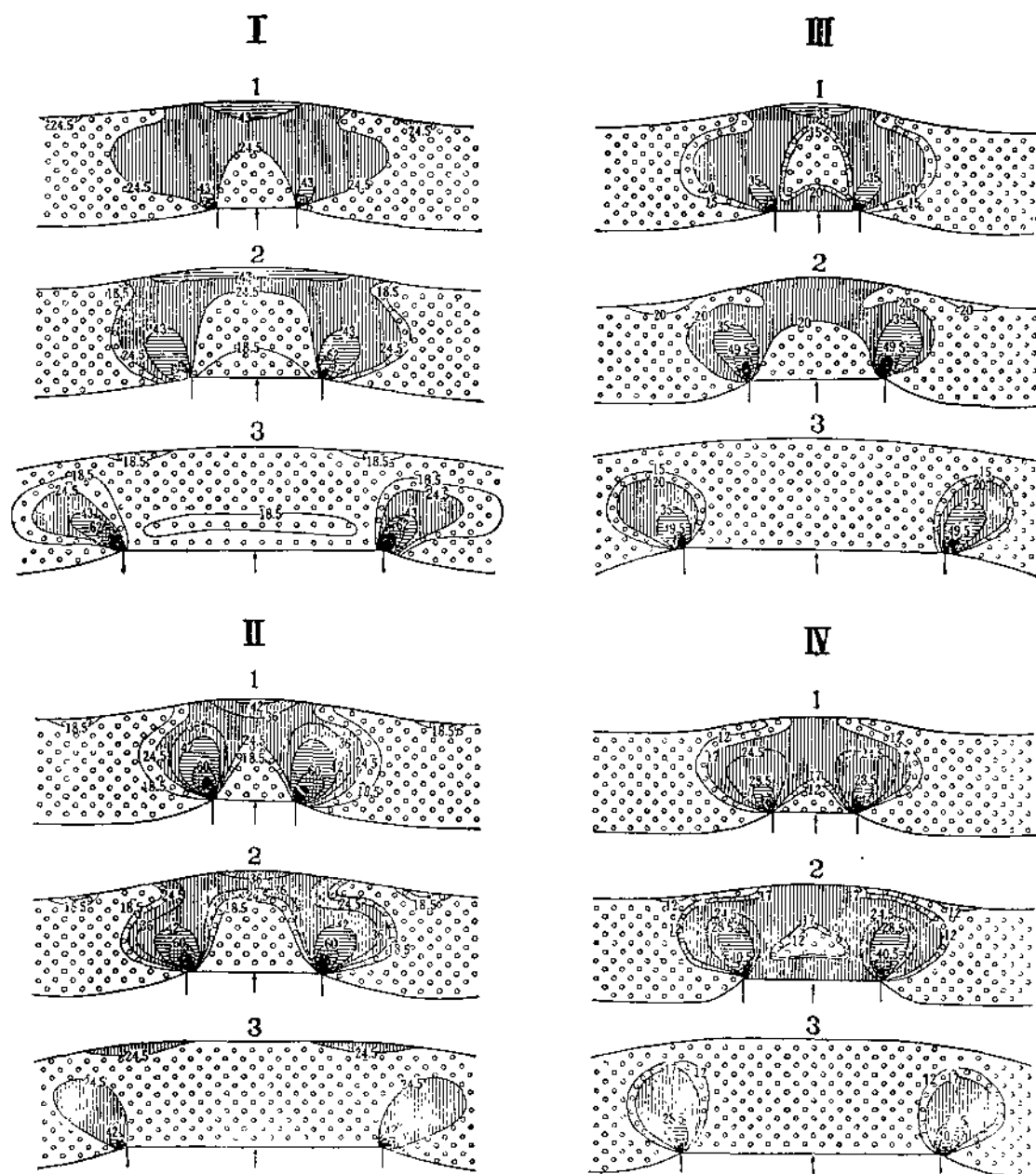


图5 横弯曲褶皱模型中剪应力的分布

I 明胶:甘油:水 $\approx 25:40:35$, II 明胶:甘油:水 $\approx 20:40:40$, III 明胶:甘油:水 $\approx 15:45:40$,
IV 明胶:甘油:水 $\approx 10:45:45$.

(图例F,图4)

模边缘上部近内侧处。在 15% 和 10% 的明胶冻中(图 5-Ⅲ, 5-Ⅳ), 各区剪应力值都相对减小了。

从图 5 中我们可以看到, 在横弯曲褶皱中, 最可能产生剪切裂隙的区域应在褶皱翼部的内侧, 其次是在背斜顶部。此外, 材料 E' 值愈小, 即材料愈软, 第一个最大剪应力值分布区的长轴与压模运动方向的夹角愈小; 在同种材料中, 压模宽度愈小, 这个夹角也愈小。这将帮助我们在野外根据剪切断裂最大密度分布区、对比岩石性质和基底断块的宽度。

2. 主应力轨道

根据标本在应力作用下的等倾线的情况, 我们分析了主应力的轨道^[7,8]。

在 25% 和 20% 的明胶冻中, 当压模宽度与标本厚度相近时, 最大主应力轨道 σ_1 (张力方向) 一般围绕压模呈穹顶状分布, 而最小主应力轨道 σ_2 (压力方向) 则垂直压模的顶面和侧面呈扇形分布。而在压模两侧, 一般最大主应力 σ_1 的轨道构成下凹的曲线, 而最小主应力 σ_2 的轨道构成上凸的曲线。两者包含的中心乃是一个各向同性点(连锁式)^[7,8]。在各向同性点上剪应力值为零。在压模宽度大大超过标本厚度时, 围绕压模两端点形成两个单独的应力作用区。这时最大主应力 σ_1 的轨道围绕两压模端点构成两个对称同心半圆形。而最小主应力 σ_2 的轨道则呈由两端点出发的放射状分布。因此在压模中央的上部就构成了一个非连锁的各向同性点(图 6-I₂, 6-II₂)。这样我们见到, 横弯曲褶皱中压模上甚至可出现 σ_1 的轨道垂直压模顶面, 而 σ_2 的轨道平行压模顶面的应力分布情况。

在材料较软时(15% 及 10% 的明胶冻), 材料传递应力的能力相对降低了。以至在压模宽度近似于(甚至小于)标本厚度时, 压模上部也可构成非连锁的各向同性点(图 6-Ⅲ, 6-Ⅳ)。应该指出的是, 在压模宽度较小的情况下, 所构成的各向同性点一般靠近压模顶面, 并且, 在标本较上部位的主应力轨道分布情况, 仍与前述情况相同。看来, 压模宽度愈大, 中间各向同性点的位置愈高; 材料愈硬, 此点位置也愈高。

这里所谈到的各向同性点下部应力分布情况是很重要的。这说明在野外分析区域应力场时, 不能仅仅根据局部地段的情况作出褶皱形成机制的结论, 而要根据大区域的总情况来判断。

3. 横弯曲褶皱中的剪应力轨道及常见的剪切断裂的类型

根据等倾线作出的剪应力轨道如图 7 所示。它一般由一对共轭的剪切应力所组成。右型剪切裂隙一般在压模右面较陡, 而在压模左面较平缓; 左型剪切裂隙则在压模左面较陡, 而在右面较平缓。

应该指出的是, 由于材料的内摩擦角不同, 剪应力轨道即最大剪应力作用面而不一定就是破裂面。实验证明, 在大多数情况下, 剪切断层而以最小主应力轴 σ_2 为分角线的夹角小于 90° 。因此, 真正的破裂面总是与剪应力轨道形成一个不大的偏角, 而此偏角的大小决定于材料的性质和变形的条件。在褶皱中任一点, 当由这种变形而产生的剪应力(τ)值超

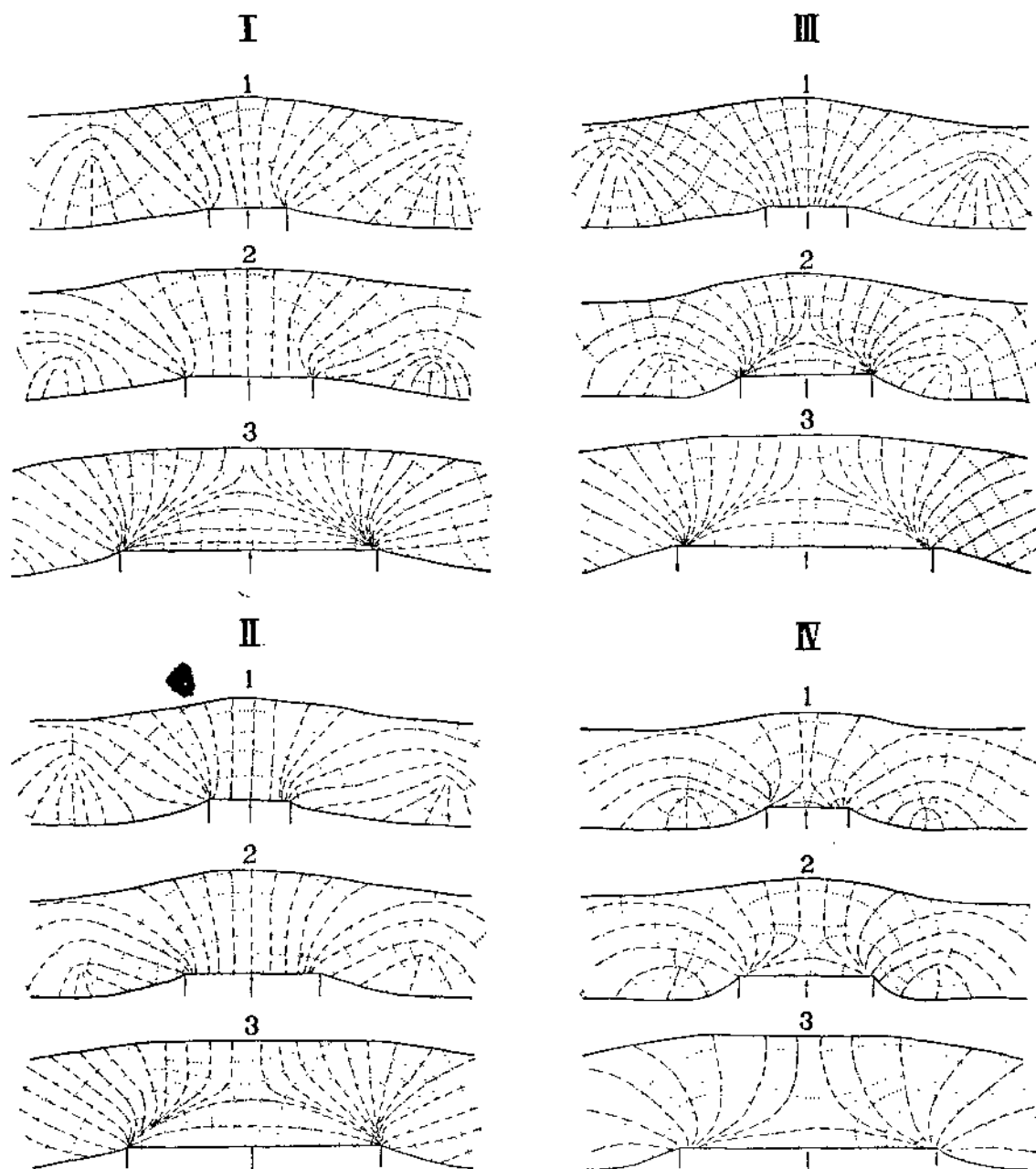


图 6 横弯曲褶皱模型中主应力轨迹

I 明胶:甘油:水=25:40:35, II 明胶:甘油:水=20:40:40,
 III 明胶:甘油:水=15:45:40, IV 明胶:甘油:水=10:45:45。

(图例同图4)

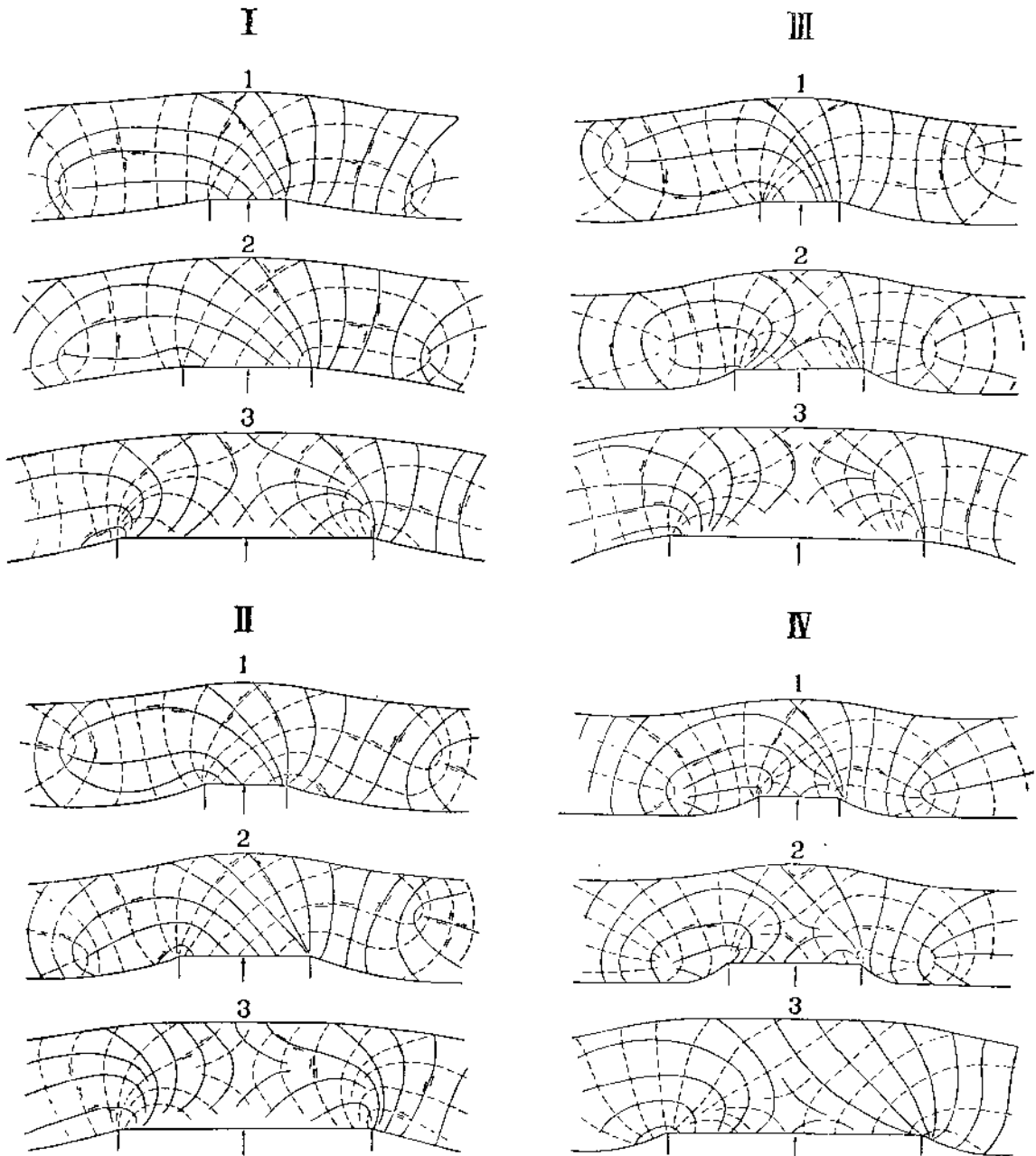


图 7 横弯曲褶皱模型中剪应力轨迹

I 明胶:甘油:水=25:40:35, II 明胶:甘油:水=20:40:40,
III 明胶:甘油:水=15:45:40, IV 明胶:甘油:水=10:45:45.

(图例同图 4)

过材料的抗剪强度 P_s 时,在该点即可发生与剪应力轨道相近的破裂面。因为各点的剪应力值不同,所以一般剪切断裂只出现在几个剪应力较大的区域。对比剪应力轨道图和剪应力值分布图,我们认为可能发生的剪切断裂系有下列两对:第一对位于标本下部压模端点上方,即相当第一个最大值分布区,它是由一组近于垂直的和另一组近于水平的共轭剪切裂隙系构成。在压模上面不产生各向同性点的情况下,在压模内侧由近于垂直的那组裂隙构成对称的三角形正断层系;在压模两端点上部则由它构成桶形的断裂系,即下部为高角度的逆断层,上部为高角度的正断层;在压模外侧由它构成蘑菇形的高角度逆断层系。与之共轭的那组近于水平的裂隙系总是与之相交。在压模上有各向同性点的情况下,在压模内侧也可能产生逆断层系。第二对剪切断裂系位于标本顶部相当第二个最大值分布

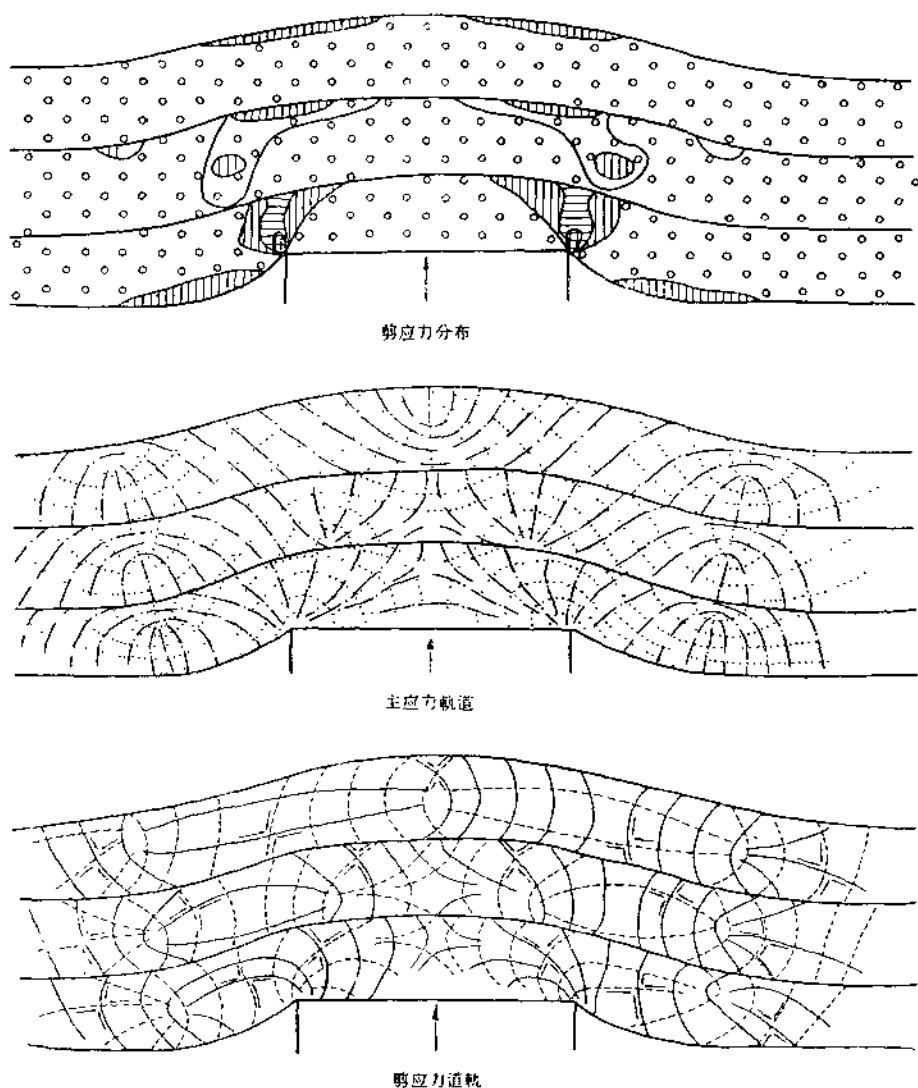


图 8 多层标本的横弯曲褶皱
(图例同图 4)

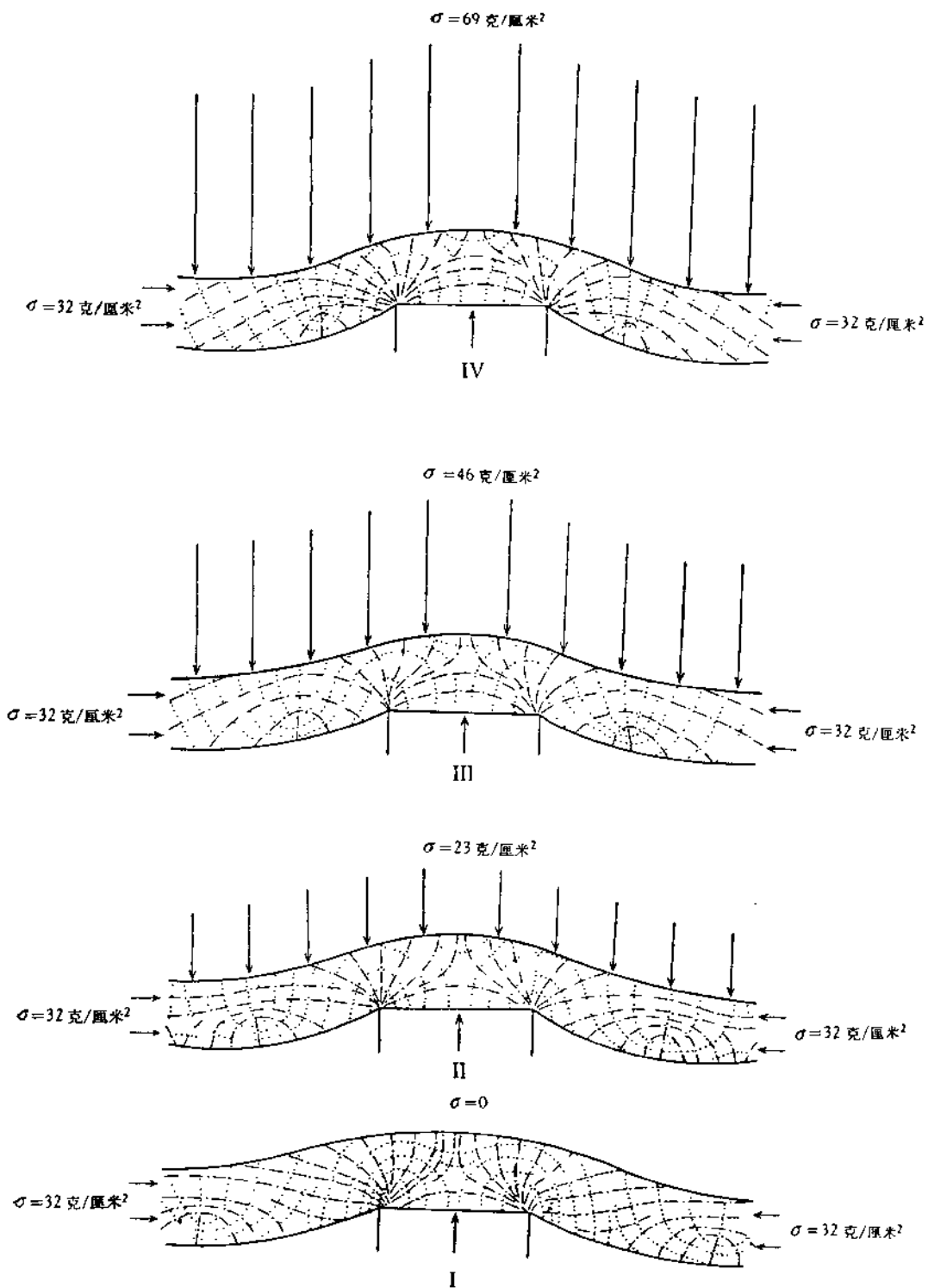


图 9 横弯曲褶皱中上覆压力和侧向压力对主应力轨道的影响(明胶:甘油:水=20:40:40)
(图例同图 4)

区，由两组斜交的正断层系组成。

作者曾用湿度为 $44 \pm 2.5\%$ 的膨润土作了横弯曲褶皱的实验^[10]。把图版Ⅱ-a—b与图7对比一下，可以发现它们是相符合的。在一些压模上升速度较快的实验中，见不到第一对共轭裂隙中较水平的那一组（图版Ⅱ-a）。考虑到强度与应力作用的时间有关^[9]，可以很容易解释这个问题：正是由于在垂直面上最大剪切应力作用的时间比同样应力在水平面上作用的时间长些，因此，在褶皱生长速度慢时，能比速度快时出现较多的平缓断层。

4. 多层标本的横弯曲褶皱(图8)

我们用不同的材料做过这方面的实验，结果大致与单层横弯曲褶皱相同。一般下部的层表现了较明显的横弯曲褶皱的特点，而上面的层，在上复压力不大时，可表现为一种类似纯弯曲的情况，它们的主应力轨道和剪应力轨道与纵弯曲褶皱中的情况（图10-1）很类似。因此，在野外分析自然现象时，要特别注意全面地综合分析。

5. 横弯曲褶皱中上复压力和侧向压力对主应力轨道的影响

图9表示在同样的侧向压力作用下，上复压力逐渐加大时，横弯曲褶皱中的主应力轨道的变化情况。图9-I表示标本在没有上复压力的情况下主应力轨道的情况。那里压模两侧的各向同性点距离压模边缘的距离大于压模的宽度，压模上部的各向同性点位于标本的较下部位。在上复压力逐渐增加的情况下（图9-Ⅱ，9-Ⅲ，9-Ⅳ），我们见到压模上面的各向同性点逐渐升高，而压模两侧的各向同性点逐渐靠近压模。因此，压模两侧的 σ_2 轨道也逐渐变陡，而 σ_1 轨道则逐渐变平缓了。假如把这种横弯曲褶皱的一翼看作一个近似的简单剪切区的话，那么在上复压力增大时就代表力偶的力愈大，侧向压力就相对减小。因此上复压力由大变小，就相当于侧向压力逐渐增大时简单剪切区的情况。如前所述，在这种情况下， σ_2 的轨道会逐渐由 45° 转为与力偶作用方向横交。而这里的情况也正是这样。同样，在相同的上复压力下，我们用逐渐加大侧向压力的办法，也得到了类似的结果。由此可见，在上复压力与侧向压力具有不同对比时，会影响到该类褶皱翼部的变形。

四、纵向挤压下不同的变形体中应力分布情况

在纵向挤压下（即顺层压力下）产生的变形类型一般有两类：1 纵弯曲：褶皱产生是由于岩层发生弯曲而成，各层的厚度不发生变化；2 纵压扁：褶皱产生是靠岩层局部厚度加大而成。关于这两类纵向挤压褶皱生成的条件，M. M. 庫茲涅佐娃作过系统的研究^[11]，这里不予重复。图10-1表示上复压力较小层间磨擦也较小时，纵弯曲褶皱中产生的剪应力分布（图版I-b）及主应力、剪应力轨道。图10-Ⅲ表示上复压力较大层间磨擦也较大时纵压扁褶皱产生的剪应力分布及主应力、剪应力轨道。图10-Ⅱ所表示的是上述两种情况的过渡型褶皱（图版I-c、I-d）。它是在上复压力较大，但层间磨擦较小，而侧向压力很大

的情况下生成的。这时岩层既遭到弯曲,同时厚度也发生了变化。应该指出的是,当岩层较硬时,第一、三类褶皱中,在岩层最大弯曲的地方,层与层往往造成脱开的现象,这种地方在自然界中往往成为热液矿床富集的场所。如澳大利亚的彭济克矿床中含金石英脉就充填在这样的地方^[12]。当岩层为软硬相间时,软岩层在这里往往会有明显的加厚现象。作者用 35% 的乙基纤维素(光塑性材料)与明胶层作出互层的标本。在侧向挤压下,明胶层造成同样的褶曲并造成同种的等色条纹。而在褶皱顶部乙基纤维素则明显地加厚了。由图 10 可见到这三类褶皱中最大剪应力分布区都是集中在褶皱核部;而不象横弯曲褶皱那样,分布在褶皱翼部。因此,在此类褶皱中,剪切裂隙发育密度最大的地区,应该在褶皱核部。从主应力轨道看,纵弯曲褶皱中,如果能产生张裂隙,它们应在背斜顶部呈放射状分布,裂隙应由岩层外侧向内发育(图 10-I₂, 10-II₂),然而纵压扁褶皱是不易产生张裂隙的。根据剪应力轨道,可以认为与这类褶皱伴生的剪切裂隙主要是逆断层,而且这些逆断层一般是从岩层底面向顶面发育的,在上面它们可以转为正断层。与之相反,和横弯曲褶皱伴生的一般是正断层或者是高角度的逆断层。

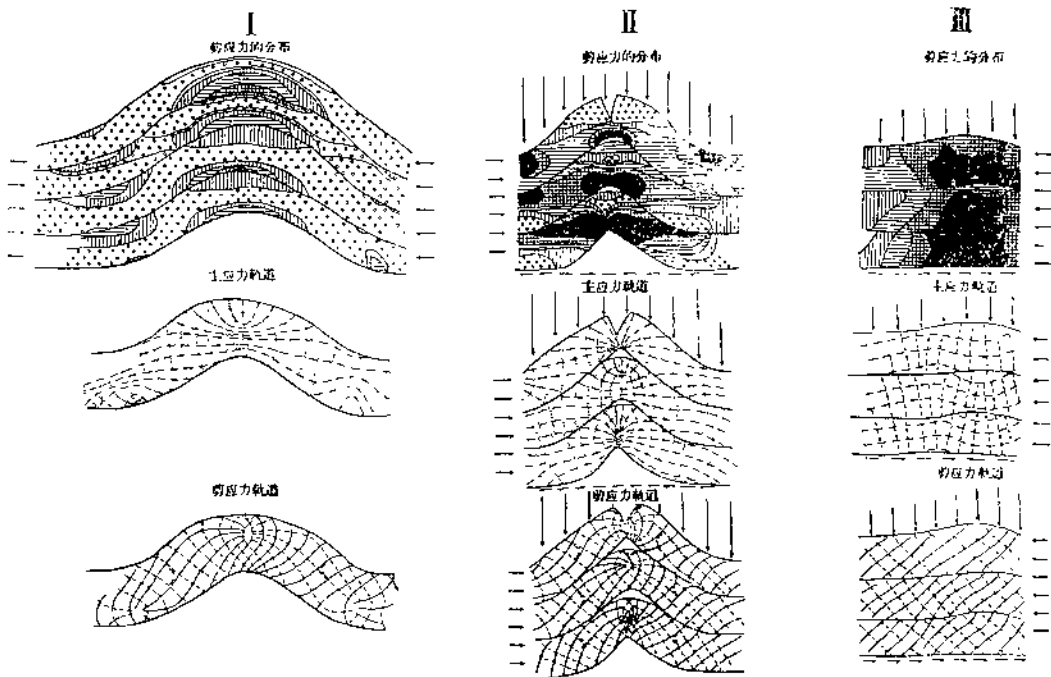


图 10 纵弯曲褶皱区

(图例同图 4)

五、结 论

1. 在简单剪切应力作用区中,最大剪切应力分布于力偶作用区;在横弯曲褶皱区,最大剪应力分布于褶皱翼部。因此在这些地区剪切裂隙的发育密度也应最大。

2. 与简单剪切应力作用区伴生的, 有羽状的张裂隙和剪裂隙; 与横弯曲褶皱区伴生的, 主要为高角度的正断层或逆断层; 而与纵向挤压褶皱伴生的, 主要为逆断层。

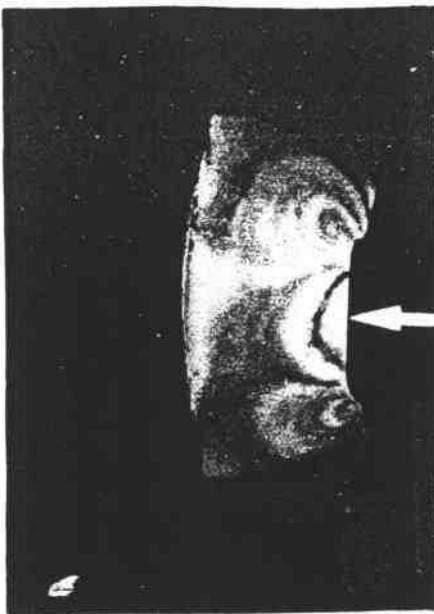
3. 在类似简单剪切应力作用区中, 随着力偶与侧向压力的比例不同, 断裂有不同的方向。伴随着侧向压力的是羽状逆断层; 伴随着侧向张力的是羽状正断层。

4. 在其它变形条件相同而材料性质(岩石性质)不同时, 可能产生不同的变形结果。

5. 以光弹性(或光塑性)模拟实验的方法研究地壳各种典型变形体的应力分布情况, 可以帮助我们了解野外地质变形体的结构特点, 从而有助于研究其成因。

参 考 文 献

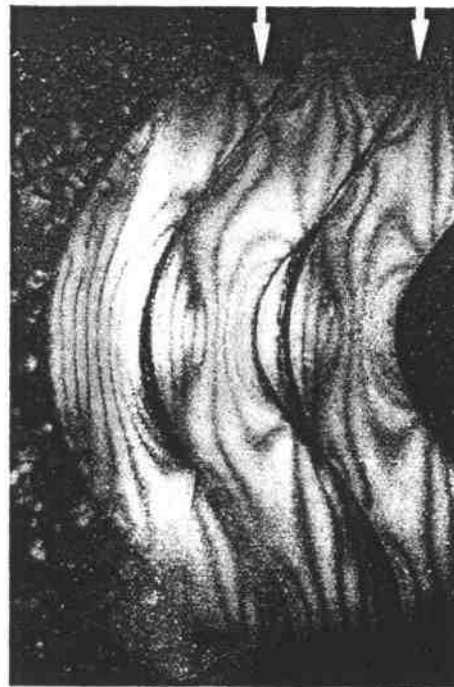
- [1] Гзовский М. В.: 1958, Метод моделирования в тектонофизике. Сов. геол. № 4.
- [2] Гзовский М. В.: 1960, Тектонофизика и проблемы структурной геологии. Международный геологический конгресс XXI сессия.
- [3] Осокина Д. Н.: 1957, Желатино-глицериновые студии как материал для оптического метода исследования напряжений. Коллоид. журнал. Т. 21, вып. 6.
- [4] Осокина Д. Н.: 1960, Пластичные оптически-активные материалы для моделирования тектонических процессов и методы исследования механических и оптических свойств этих материалов. в сб. "Проблемы тектонофизики". Гостеолтехиздат.
- [5] Currie J. B., Patnode H. W., Trump R. P.: 1962, Development of folds in sedimentary strata. The Geological Society of America Bulletin. June.
- [6] Nadai A.: 1950, Theory of flow and fracture of solids. Vol. I.
- [7] 费洛赫特 М. М.: 1955, 光测弹性力学. 第一卷. 大东书局出版.
- [8] 徐宏文编著: 1962, 应力分析. 科学出版社.
- [9] Гзовский М. В.: 1960, Физическая теория образования тектонических разрывов. в сб. "Проблемы тектонофизики". Гостеолтехиздат.
- [10] Гзовский М. В., Ма Цзинь: 1962, Зависимость строения складок поперечного изгиба от скорости и истории их роста. "Результаты экспериментов с моделями" в сб. "Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования" Изд. АН СССР. Москва.
- [11] Кузнецова И. М.: 1962, Выяснение условий возникновения складок продольного изгиба и продольного расплющивания методом моделирования. в сб. "Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования."
- [12] Herman H.: 1923, Structure of Bendigo Goldfield. Bull. Geol. Survey, Victoria, 47.



a. 明胶标本横弯曲时的干涉色条纹
(在双偏光镜下)



b. 明胶标本纵弯曲时的干涉色条纹
(在双偏光镜下)



c_1



c_2

c. 在重复压力作用下多晶明胶标本纵弯曲时产生的干涉色条纹
其中: c_1 为侧向压力较小时, c_2 为侧向压力较大时