

讨论：褶皱几何学

- Alpino- (Jura-, German-) type fold是在何种应力和变形条件下形成的？
- Ramsay为什么提出基于等倾斜线的褶皱分类方案？这种分类有何意义？



第五章 褶皱

- 褶皱几何学
- 褶皱成因分析

5.2 褶皱成因分析

- 概述
- 纵弯褶皱作用
- 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造
- 其它褶皱作用

5.2.1 褶皱成因概述

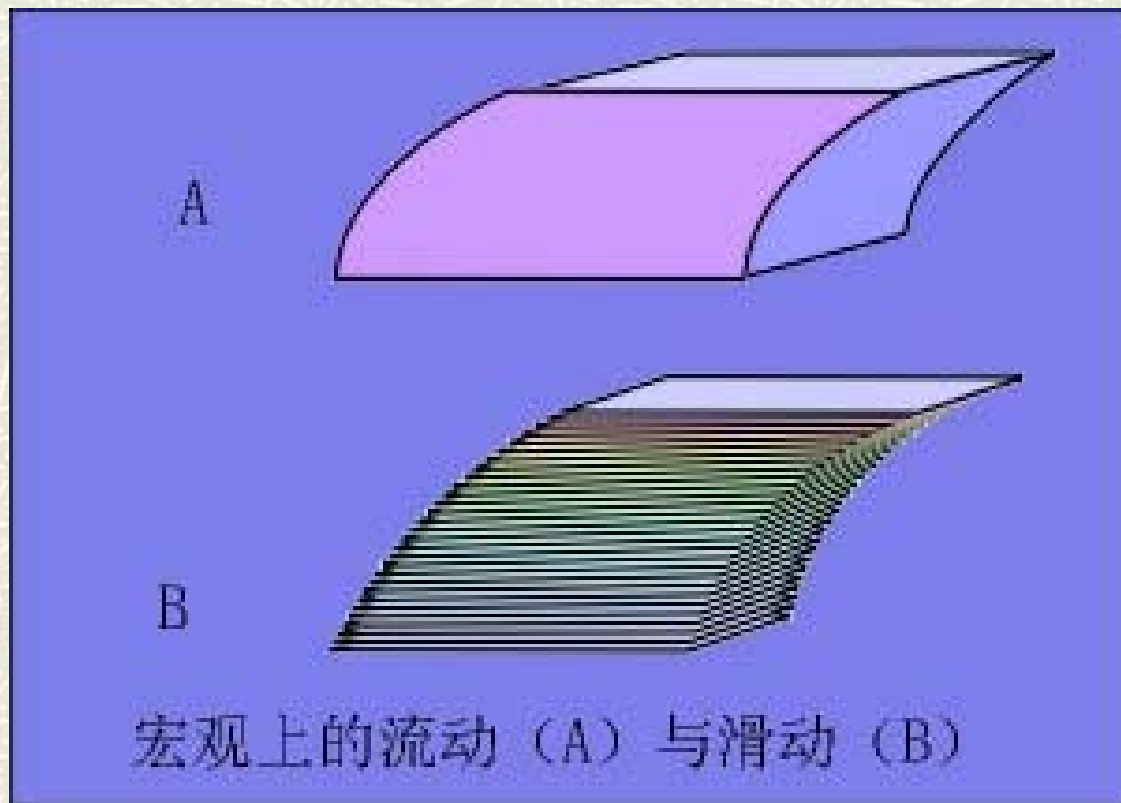
➤ 褶皱成因分析的目的

- 了解褶皱多样的形态及组合特点
- 褶皱的区域展布及与地壳运动的关系
- 对矿产的控制规律
- 侧压力，重力，岩石力学性质等控制因素在褶皱发育过程中的作用
- 褶皱层内部应变及其与其它构造的内在联系

5.2.1 褶皱成因概述

褶皱成因分类

- ▶ 据物质运动方式分类
 - 滑动
 - 流动
- ▶ 据作用力方式分类
 - 纵弯
 - 横弯



5.2.2

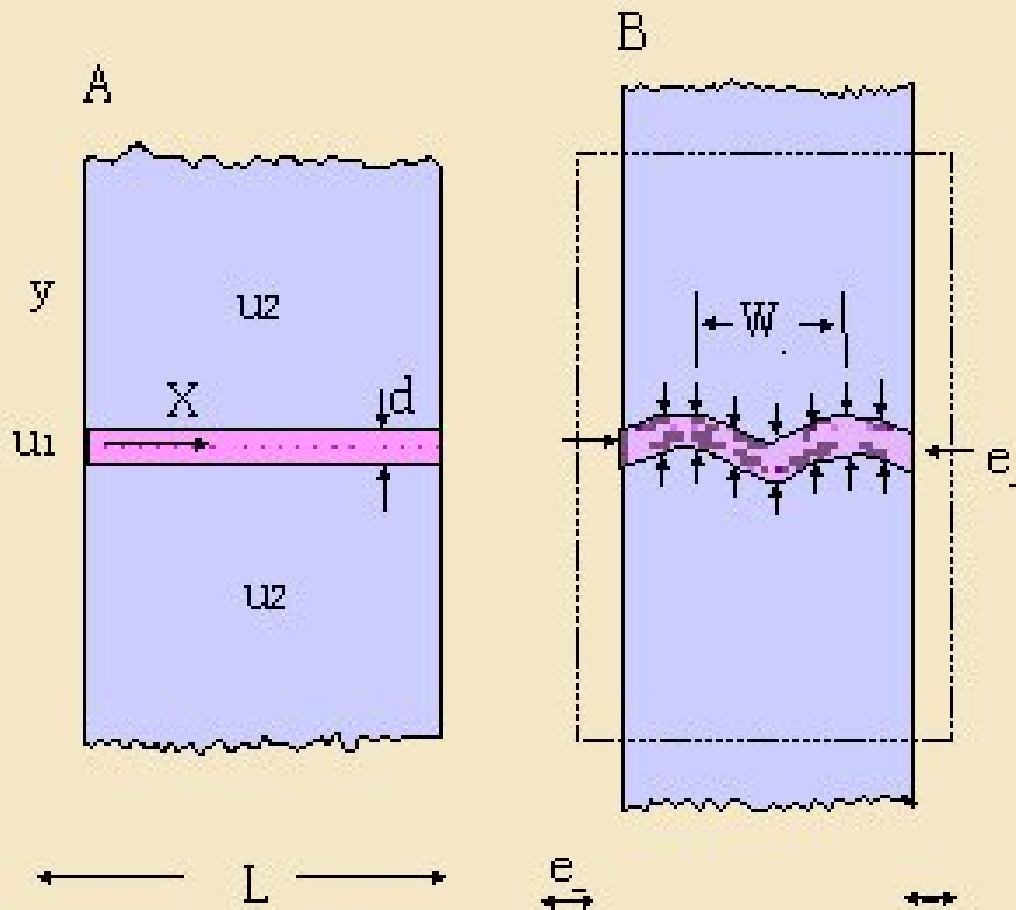
纵弯褶皱作用

- 纵弯褶皱作用：岩层受到顺层挤压力而形成褶皱的作用
- 岩层之间的力学性质差异起主导作用
 - 硬层主动褶皱
 - 软层被动缩短

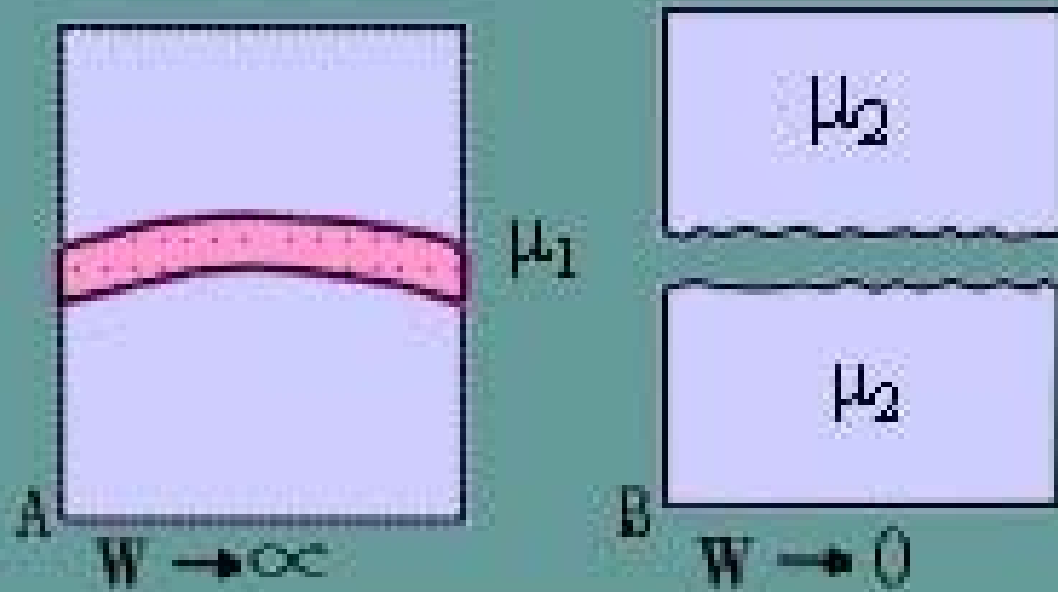
5.2.2.1 纵弯褶皱作用

单层褶皱的发育机制

- 岩层褶皱的阻抗来自强硬层内部和相邻的软弱层
 - 强硬层内部，趋于形成大波长
 - 软弱层，阻止大波长形成
 - 根据最小功原理，褶皱波长为二者之间的调和中间值



关于粘度的基质中的单层厚度为 d 粘度为 u_1 的强硬层的纵弯曲模型
 平行层的缩短 e_2 使强硬层形成褶皱, W_0 为初始主波长, e_1 为缩短应变速率,
 小箭头表示层内外的阻抗. 图中 e_1 及褶皱的幅度是夸大表示的.



可能的初始波长模式

A-只有强硬层, 形成大波长 B-基质要求形成小波长

5.2.2.1 纵弯褶皱作用

褶皱主波长理论

$$Wi = 2\pi d \sqrt[3]{\mu_1 / 6\mu_2}$$

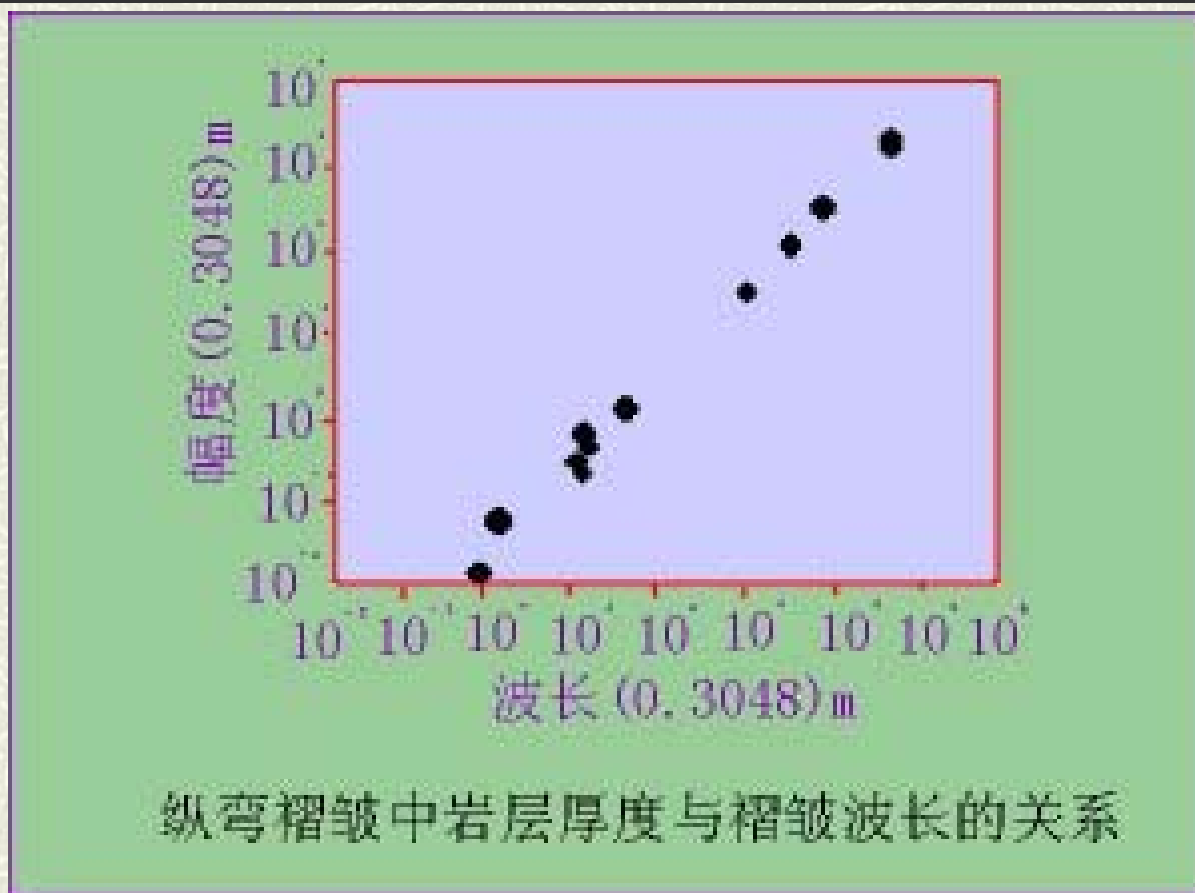
➤ **Biot** 等根据计算和实验提出

■ 把岩层视作弹性板

■ d ——岩层厚度； μ_1 ——强层粘度； μ_2 ——弱层（基质）粘度

➤ 主波长理论表明：初始主波长与强岩层的厚度和强岩层与介质的粘度比有关，而与作用力无关

5.2.2.1 纵弯褶皱作用 褶皱主波长理论



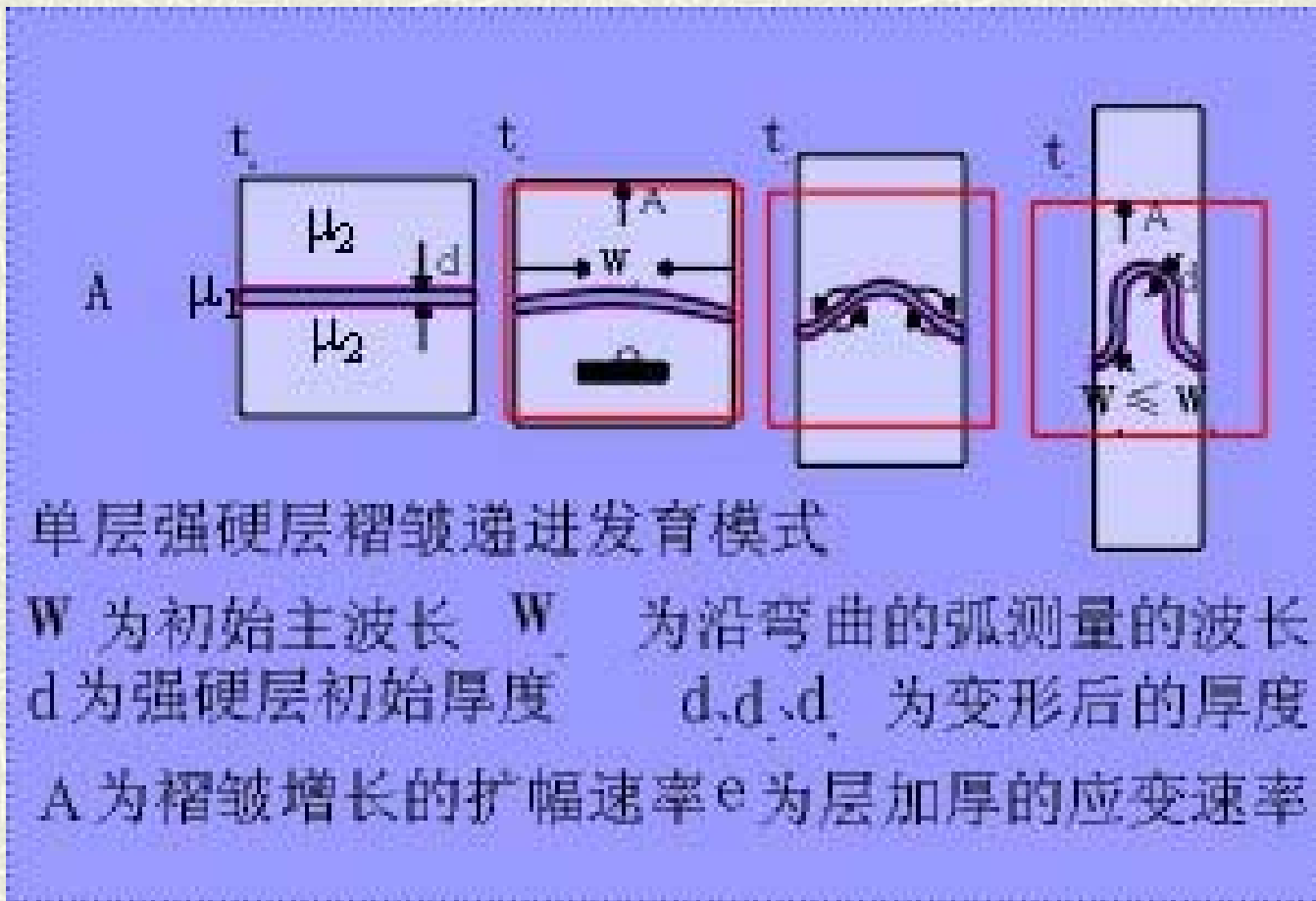
褶皱主波长与强岩层厚度成正比

5.2.2.1 纵弯褶皱作用

褶皱主波长理论 (μ_1/μ_2)

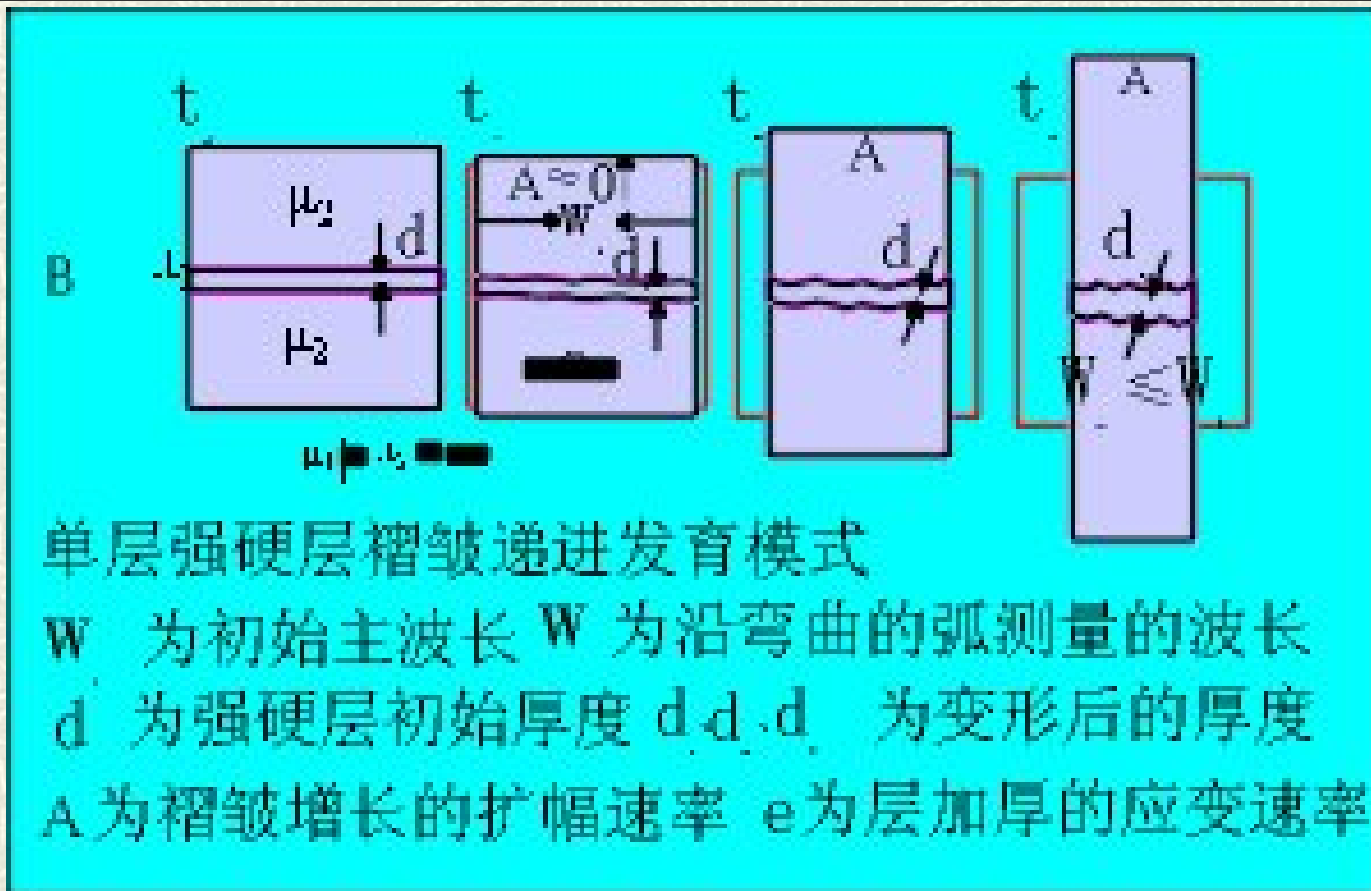
- 褶皱主波长与强岩层粘度(μ_1)与介质粘度(μ_2)的比值有关
- 2种典型（极端）情况
 - $\mu_1/\mu_2 > 50$
 - ——来自基质的阻抗很小（设想为强岩层处于近于自由空间的环境中）
 - $\mu_1/\mu_2 < 10$
 - ——来自基质的阻抗很大（强岩层难以自由褶皱变形）

5.2.2.1 纵弯褶皱作用 褶皱主波长理论 ($\mu_1/\mu_2 > 50$)



$\mu_1/\mu_2 > 50$ ——来自基质的阻抗很小

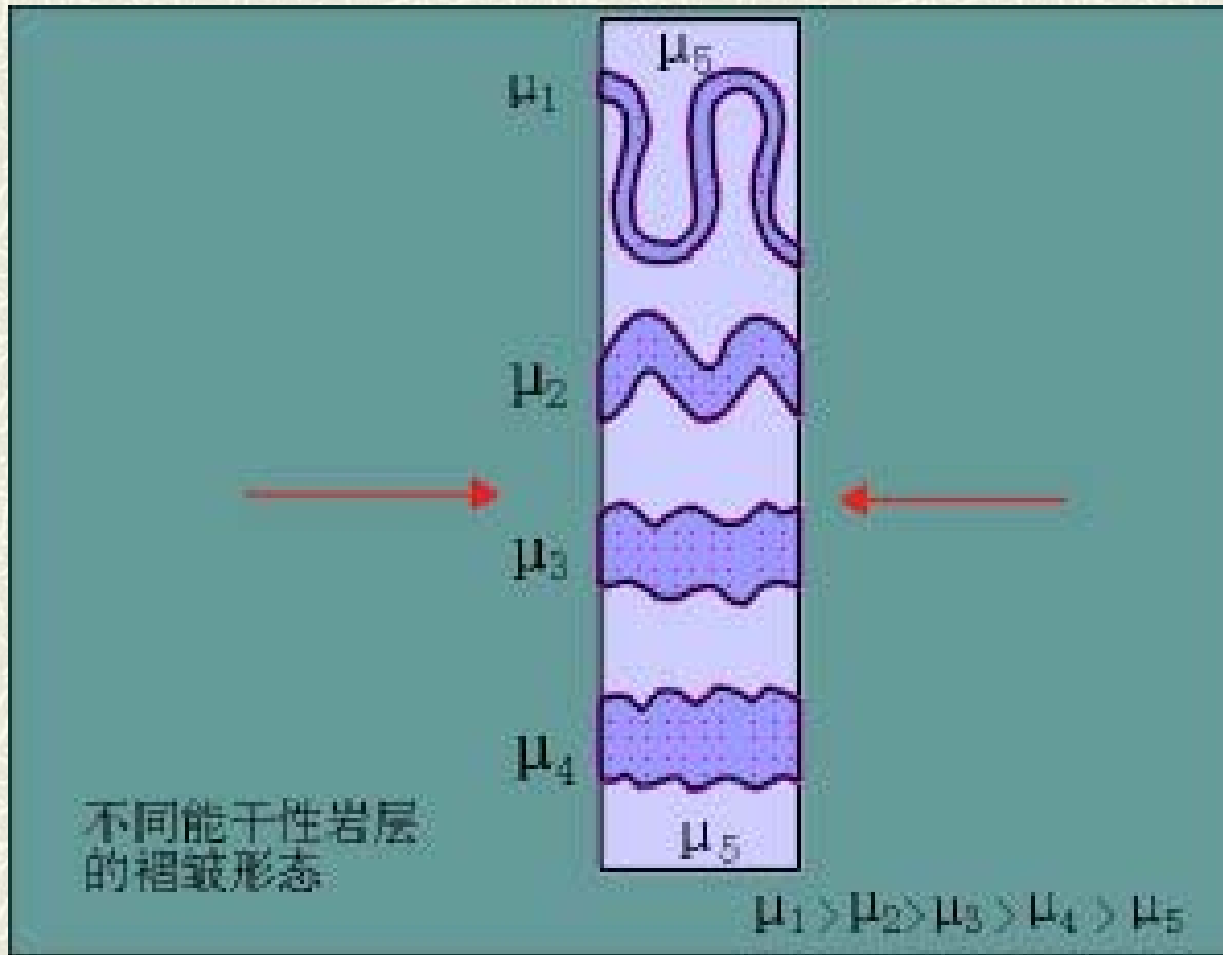
5.2.2.1 纵弯褶皱作用 褶皱主波长理论 ($\mu_1/\mu_2 < 10$)



$\mu_1/\mu_2 < 10$ ——来自基质的阻抗很大； $W_a \ll W_i$

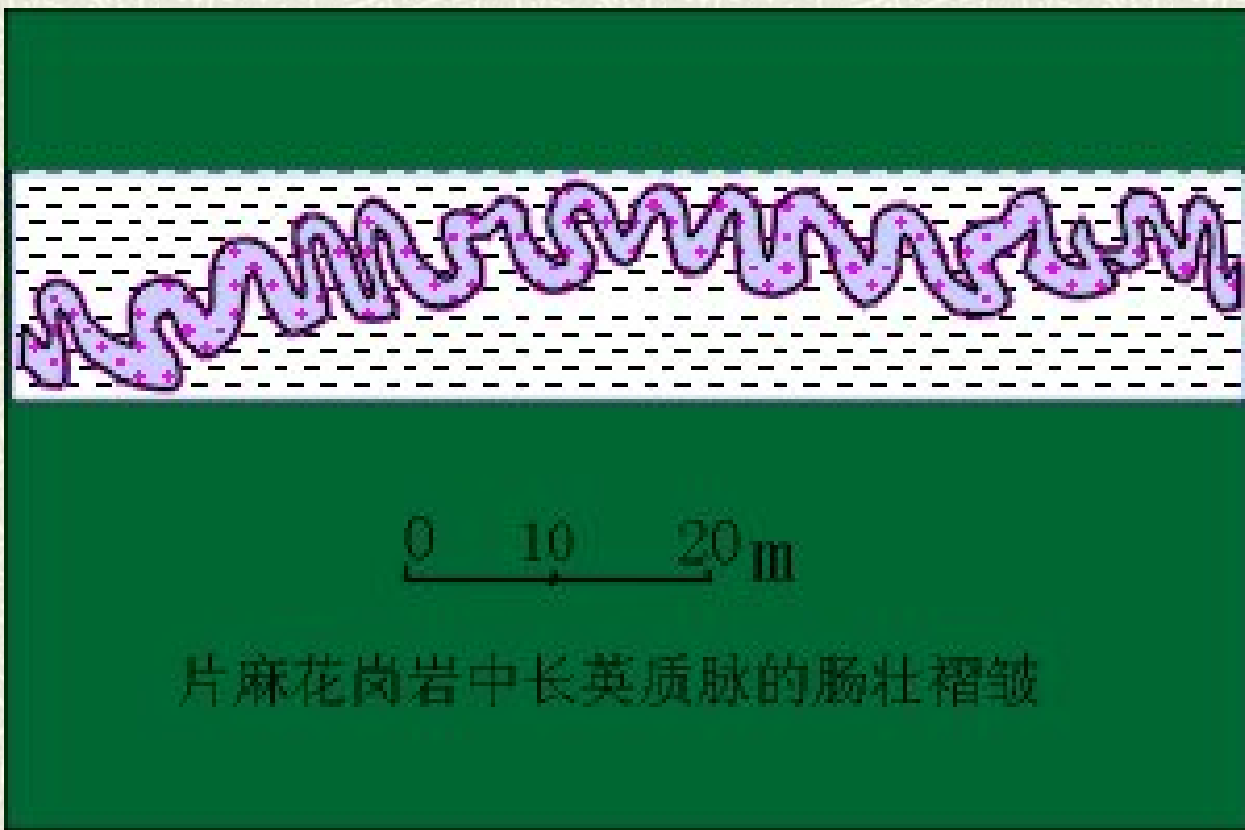
5.2.2.1 纵弯褶皱作用

褶皱主波长理论（不同的粘度比）



5.2.2.1 纵弯褶皱作用

褶皱主波长理论



粘度比小，形成肠状褶皱

5.2.2.2 纵弯褶皱作用

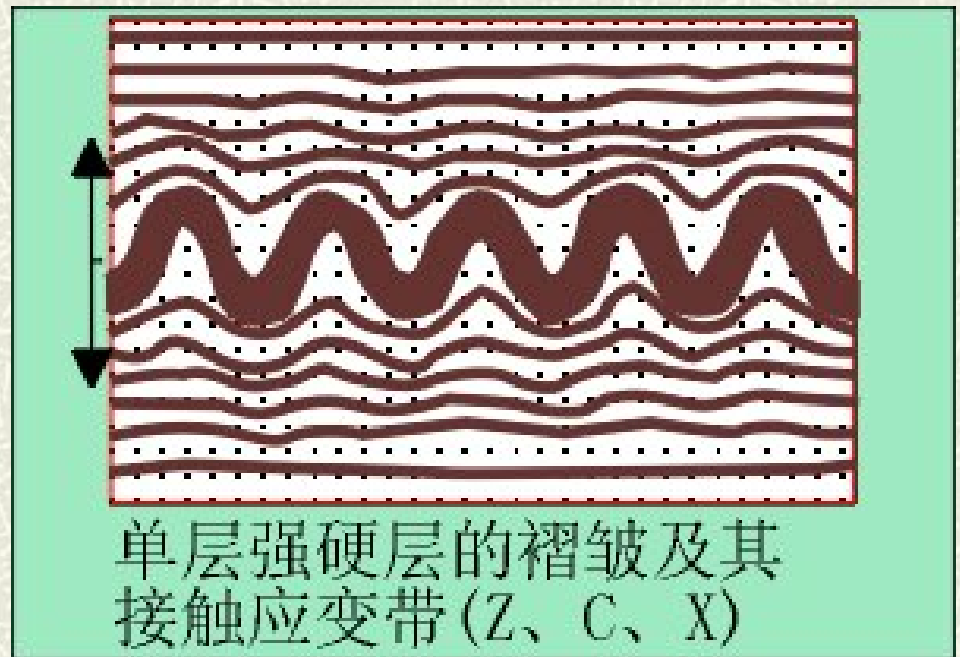
多层岩层的褶皱发育

➤ 控制褶皱形态的影响因素

- 各层的能干性
- 相邻层互相影响
 - 强层间的距离
 - 接触应变带的宽度

5.2.2.2 纵弯褶皱作用 接触应变带

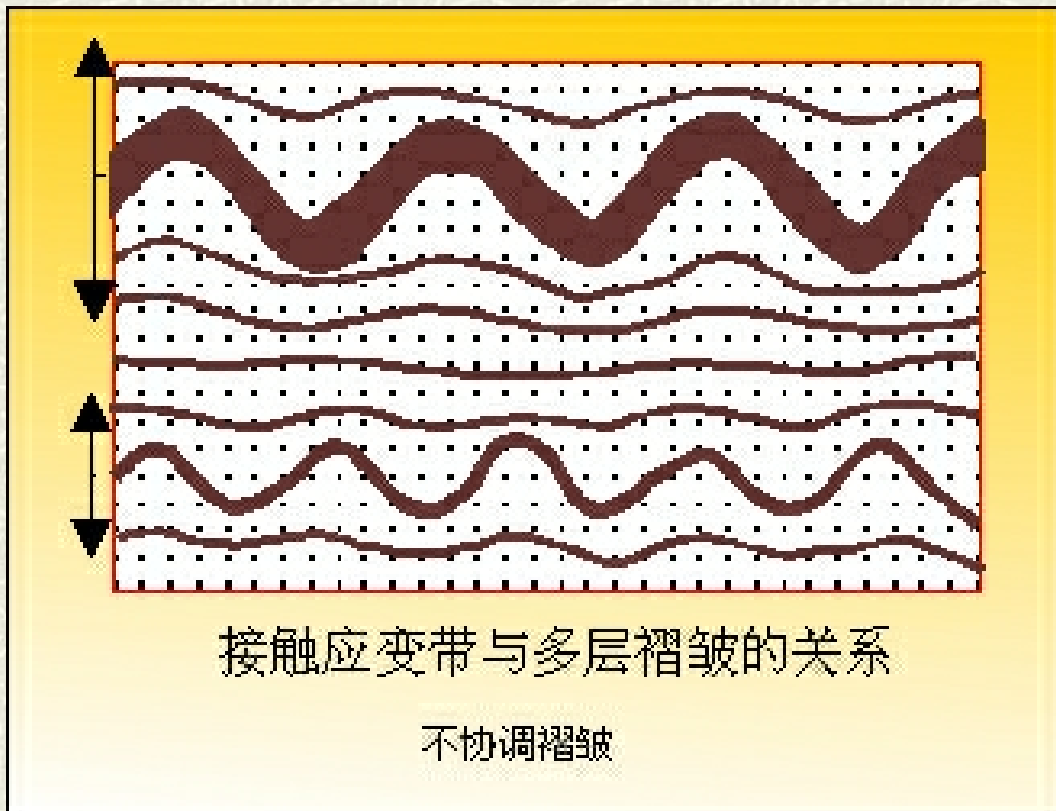
- 接触应变带指的是“硬层”褶皱对介质的影响范围。接触应变带以外，介质不产生明显的褶皱，仅仅发生均匀缩短
- 接触应变带的宽度
 - 强硬层初始主波长 (W_i)



5.2.2.2 纵弯褶皱作用

接触应变带与强硬层间距

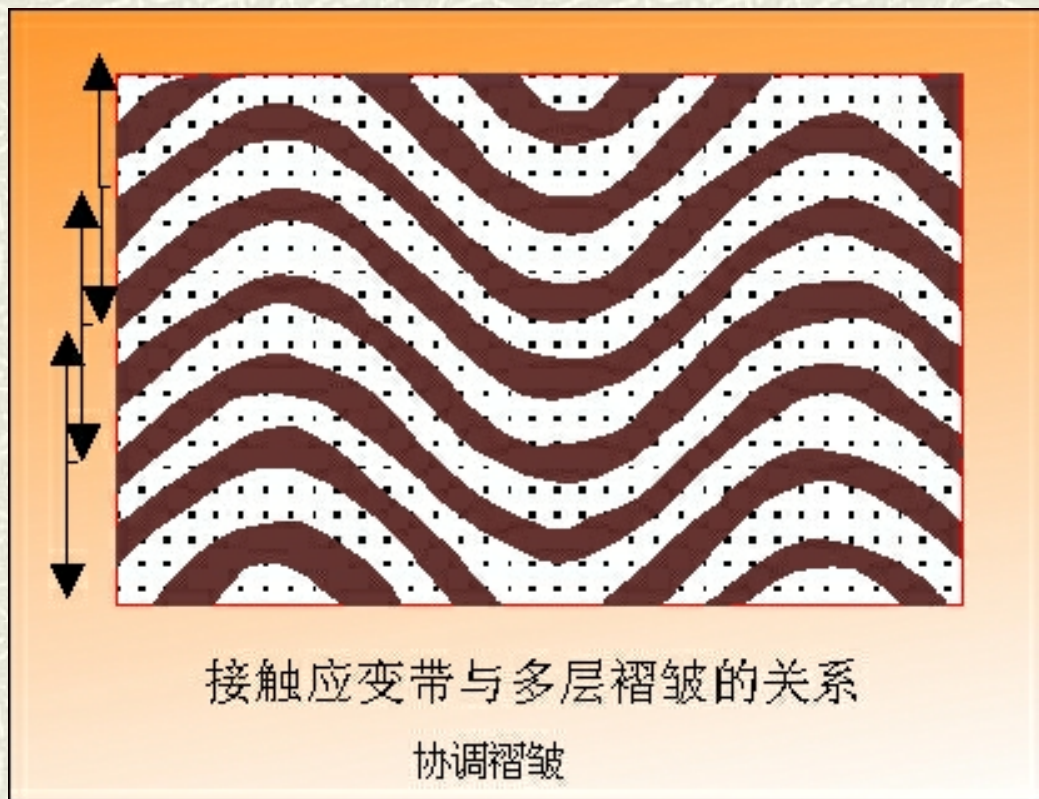
- 两“硬层”间隔远，互不影响，形成各自的特征波长褶皱，整个岩系不协调



5.2.2.2 纵弯褶皱作用

接触应变带与强硬层间距

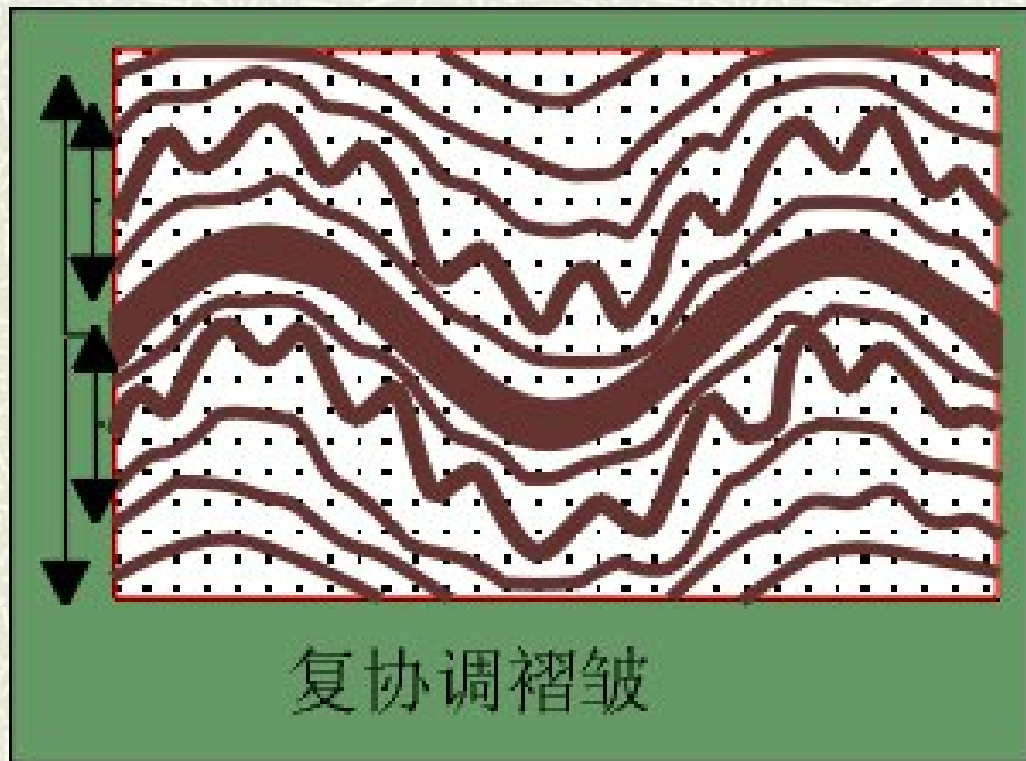
- 两“硬层”间隔小，相互干扰，但厚度、粘度相同，形成协调褶皱



5.2.2.2 纵弯褶皱作用

接触应变带与强硬层间距

- 不规则互层岩系
- 硬层间隔小（位于接触应变带内），各层的粘度、厚度不同，形成复协调褶皱



5.2.2.2 纵弯褶皱作用

规则互层岩系的褶皱

➤ 令：

$$n = d_2 / d_1$$

■ d_1 —— 硬层厚度

■ d_2 —— 软层厚度

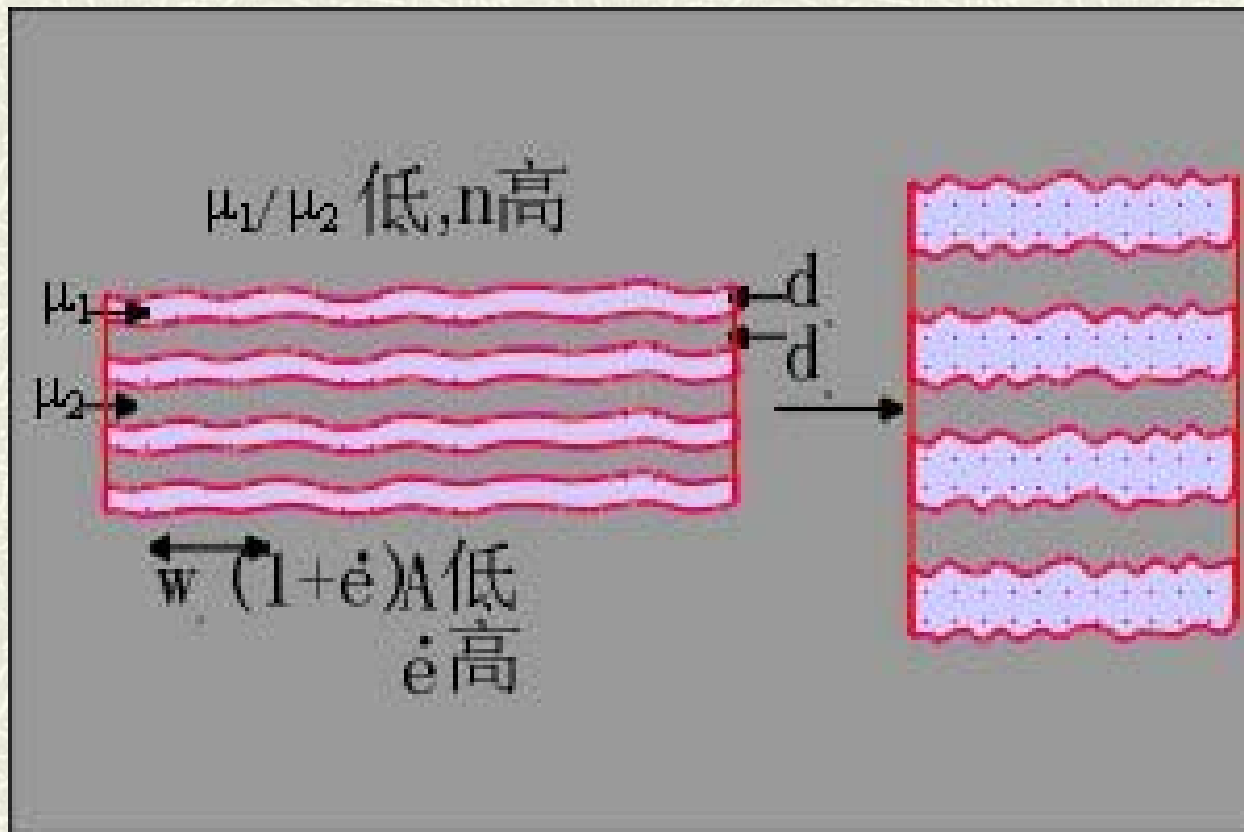
$$\mu_1 > \mu_2$$

■ μ_1 —— 硬层粘度

■ μ_2 —— 软层粘度

5.2.2.2 纵弯褶皱作用

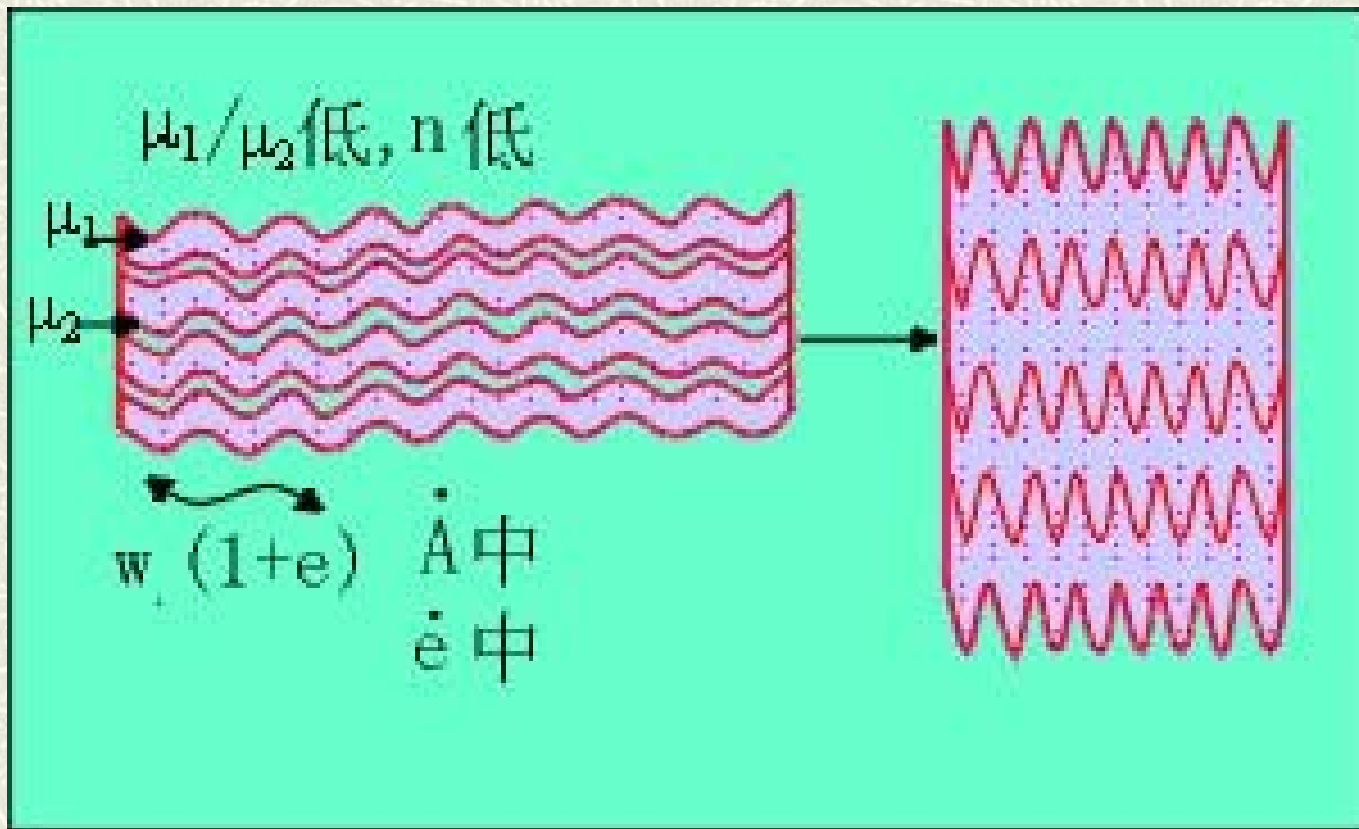
多层规则相间的强硬层的褶皱



n 高（软层较厚）， μ_1/μ_2 低

5.2.2.2 纵弯褶皱作用

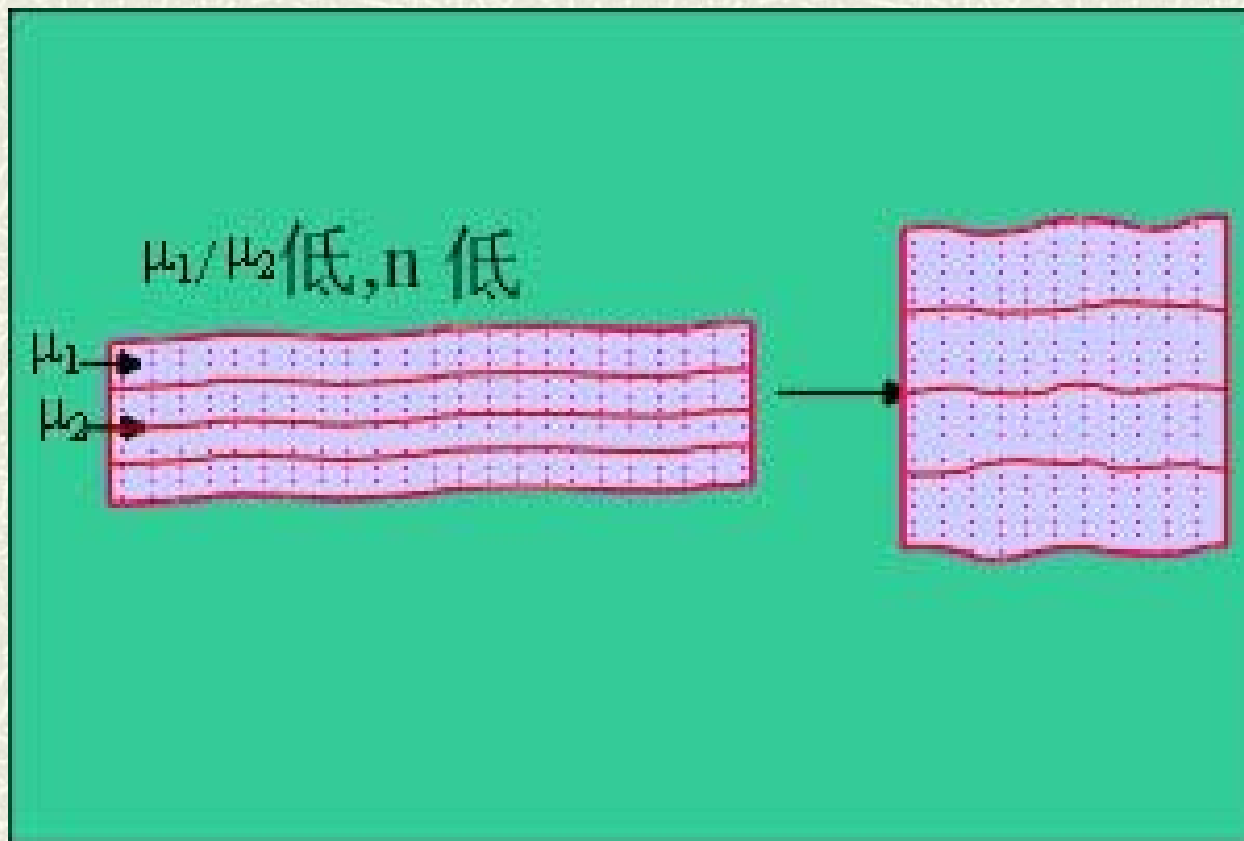
多层规则相间的强硬层的褶皱



n 中等, μ_1/μ_2 低, 褶皱形态明显, 进一步压扁后成压扁的平行褶皱

5.2.2.2 纵弯褶皱作用

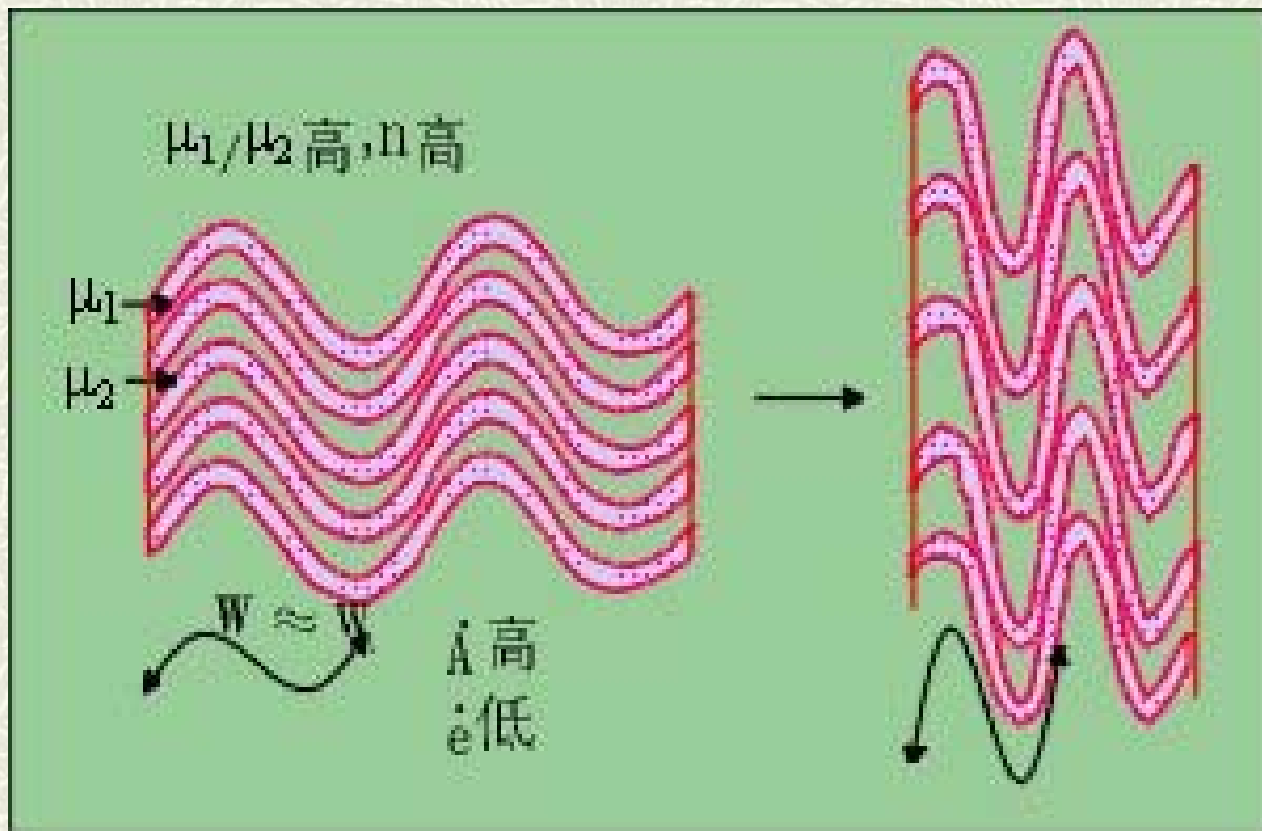
多层规则相间的强硬层的褶皱



n 小(软层很薄), μ_1/μ_2 低, 岩层普遍压扁

5.2.2.2 纵弯褶皱作用

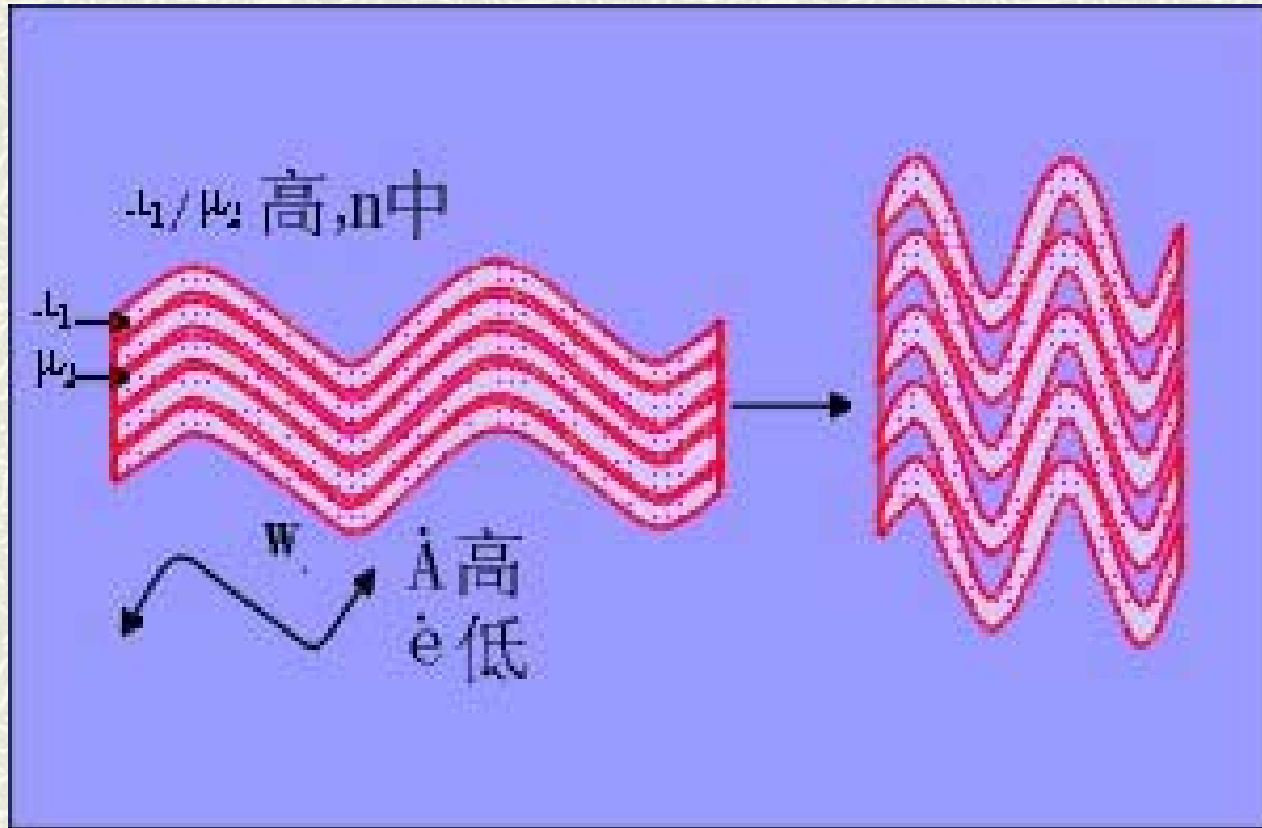
多层规则相间的强硬层的褶皱



n 高（软层较厚）， μ_1/μ_2 高

5.2.2.2 纵弯褶皱作用

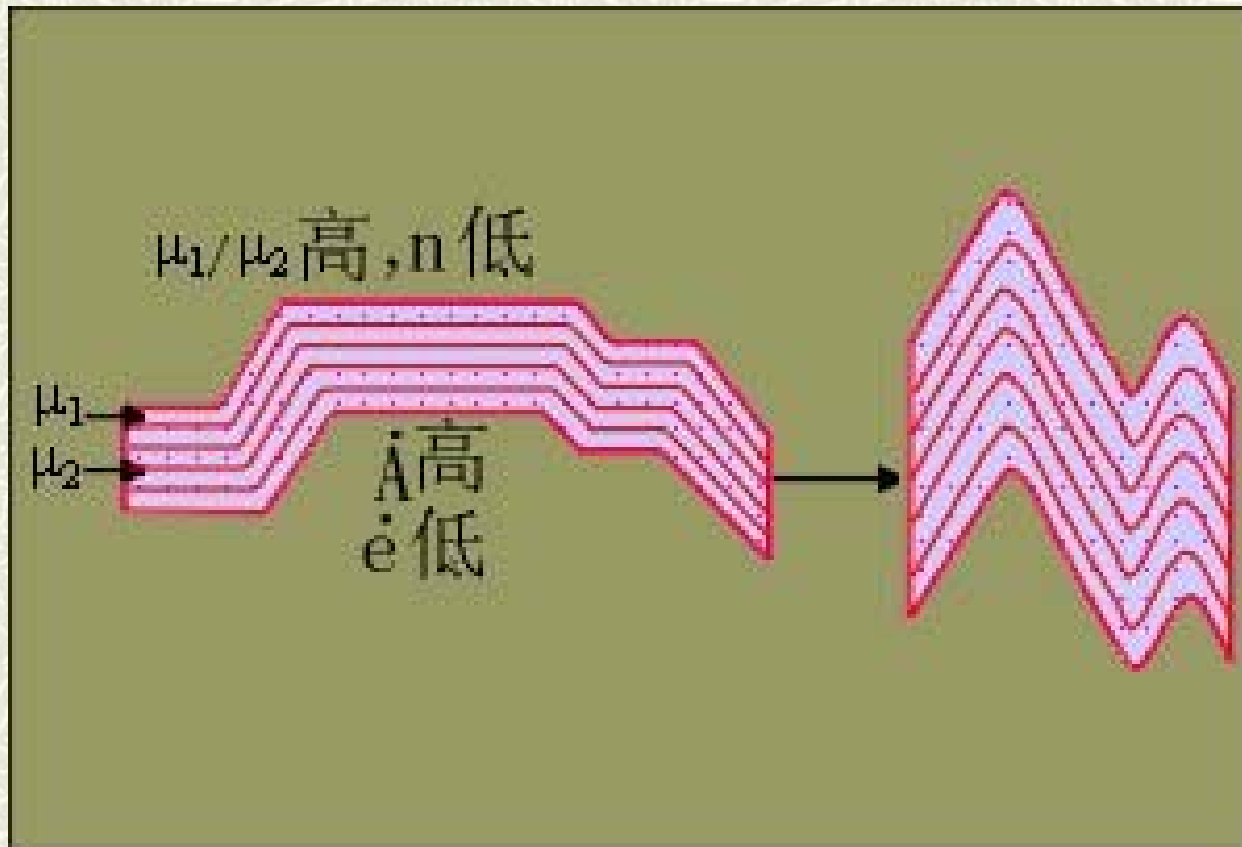
多层规则相间的强硬层的褶皱



n 中等, μ_1 / μ_2 高, 发育尖棱状褶皱

5.2.2.2 纵弯褶皱作用

多层规则相间的强硬层的褶皱



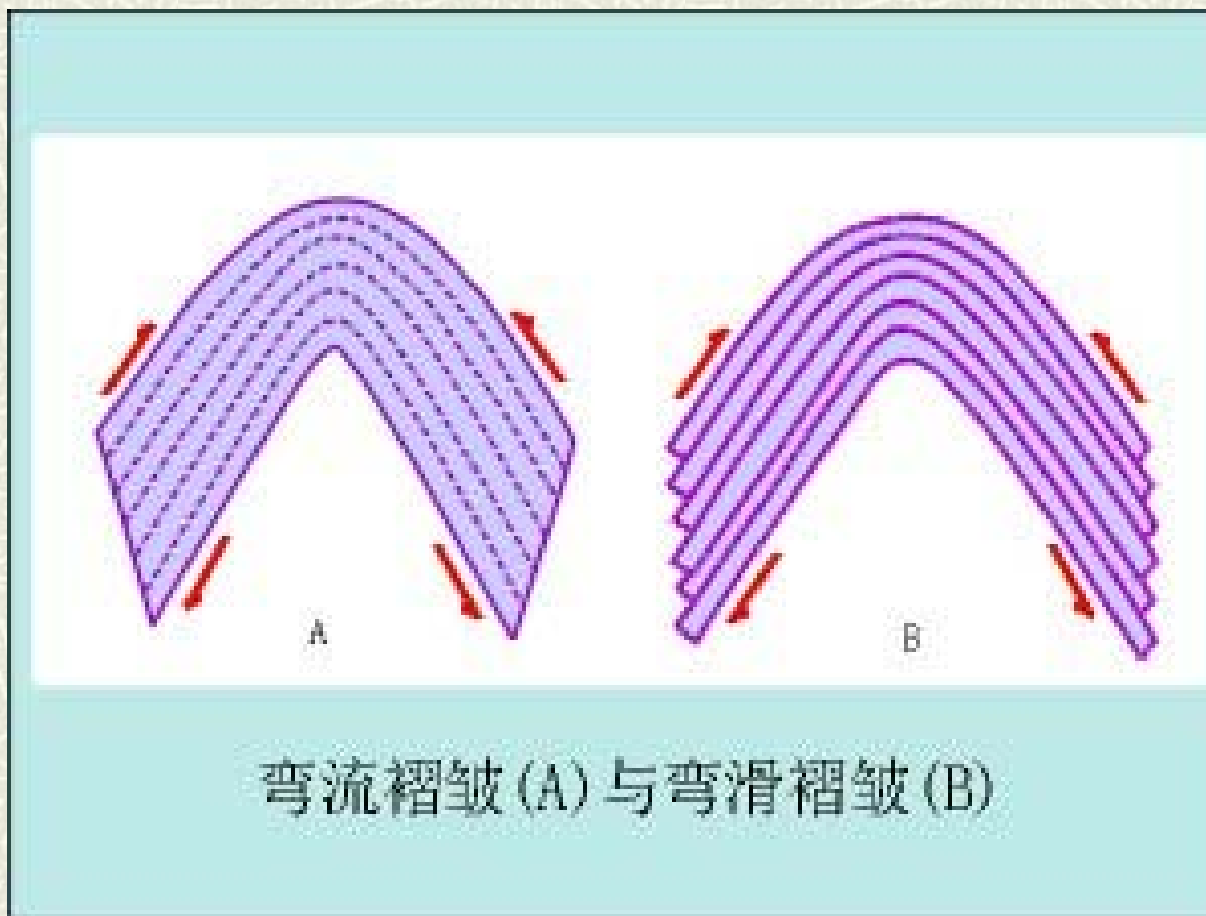
- n 低, μ_1/μ_2 高(薄的硬层岩系, 夹少量软层起润滑作用)
- 没有初始特征波长, 形成膝折—不规则尖棱褶皱

5.2.3

纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造

- 纵弯褶皱层内应变特征的控制因素
 - 层的弯曲方式
 - 弯滑
 - 弯流
 - 压扁作用
- 应变分布控制小构造的类型和形成

5.2.3.1 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造 弯流作用与弯滑作用

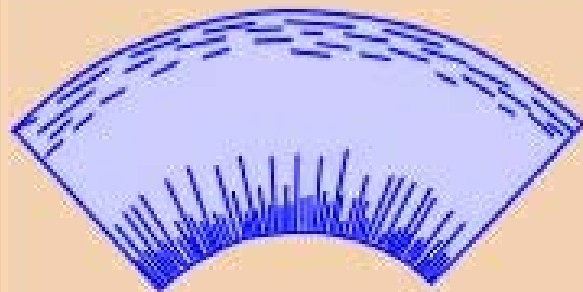
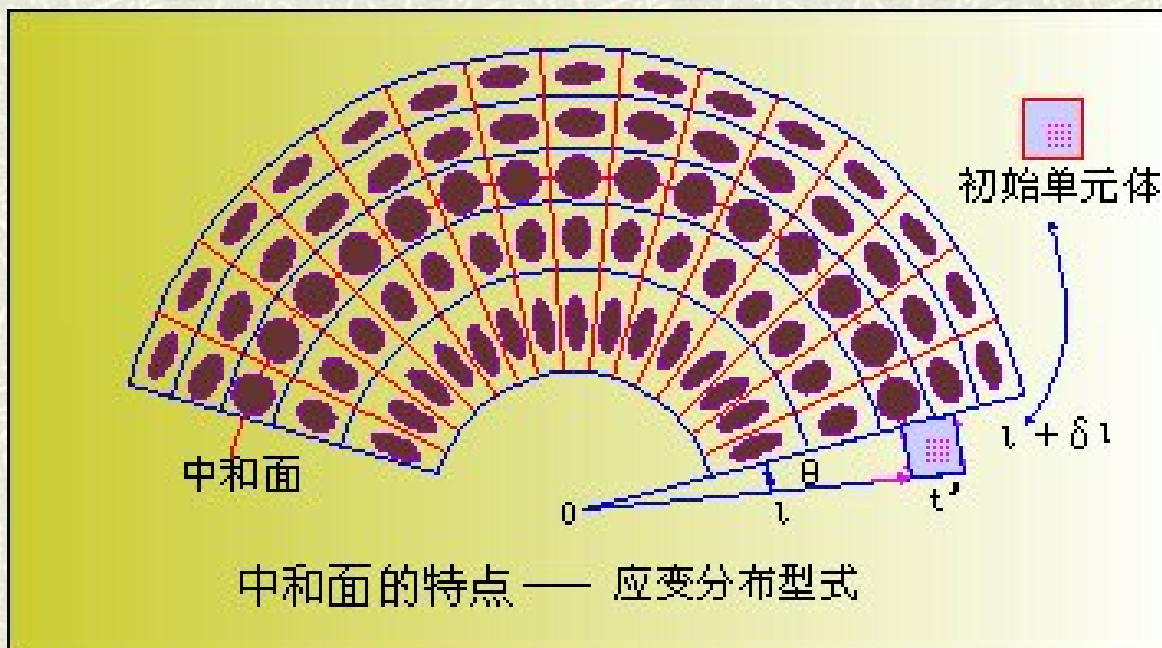


➤ 视频：[弯滑褶皱](#)和[弯流褶皱](#)

5.2.3.2 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造中和面褶皱作用

- μ_1 / μ_2 较大时，强岩层具有此种特征
- 中和面是位于层内的无应变面
- 应变特征：平面应变
- 褶皱形态：1 B 平行式
- 切向长度应变—外弧伸长，内弧缩短
- 小构造的发育：决定于变形时的韧性

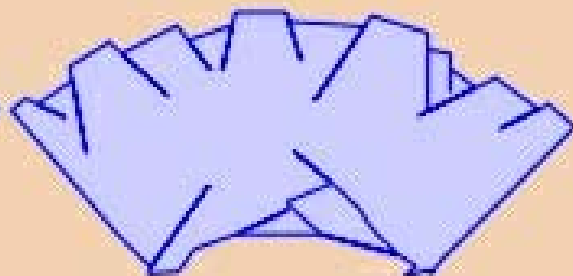
5.2.3.2 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造 中和面褶皱作用：应变分布和伴生构造



劈理



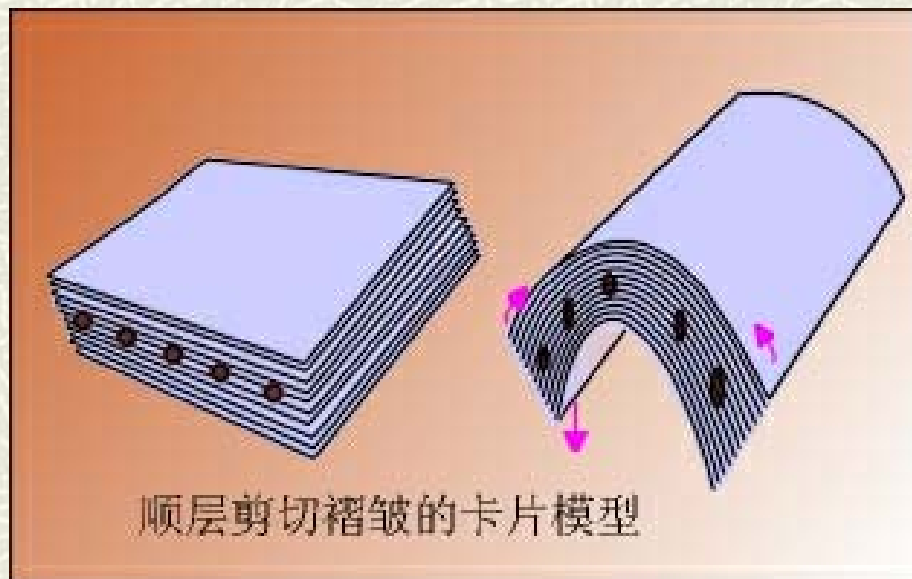
张裂



剪裂

5.2.3.3 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造 顺层剪切作用

- ▶ 弯滑作用与弯流作用在宏观上具有共性
 - 软层形成平行褶皱时，应变椭圆表明其受到简单剪切作用，以弯流作用为主
 - 硬层----差异性顺层剪切。当硬层厚度薄到可以忽略不记时，看作宏观上的弯流作用

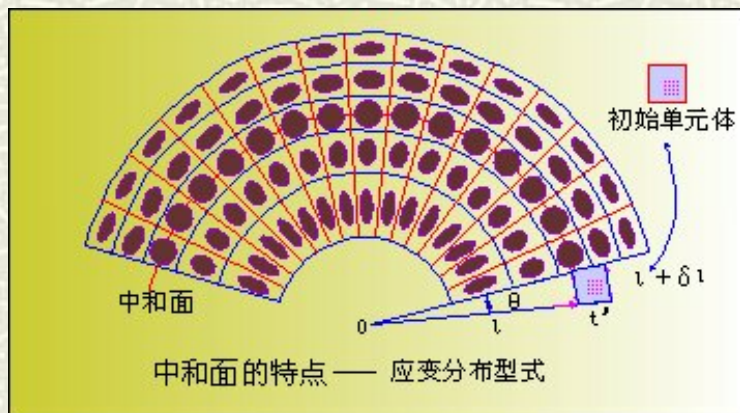


应变椭圆示弯流作用（没有中和面）。流动是通过小尺度的层间滑动实现的

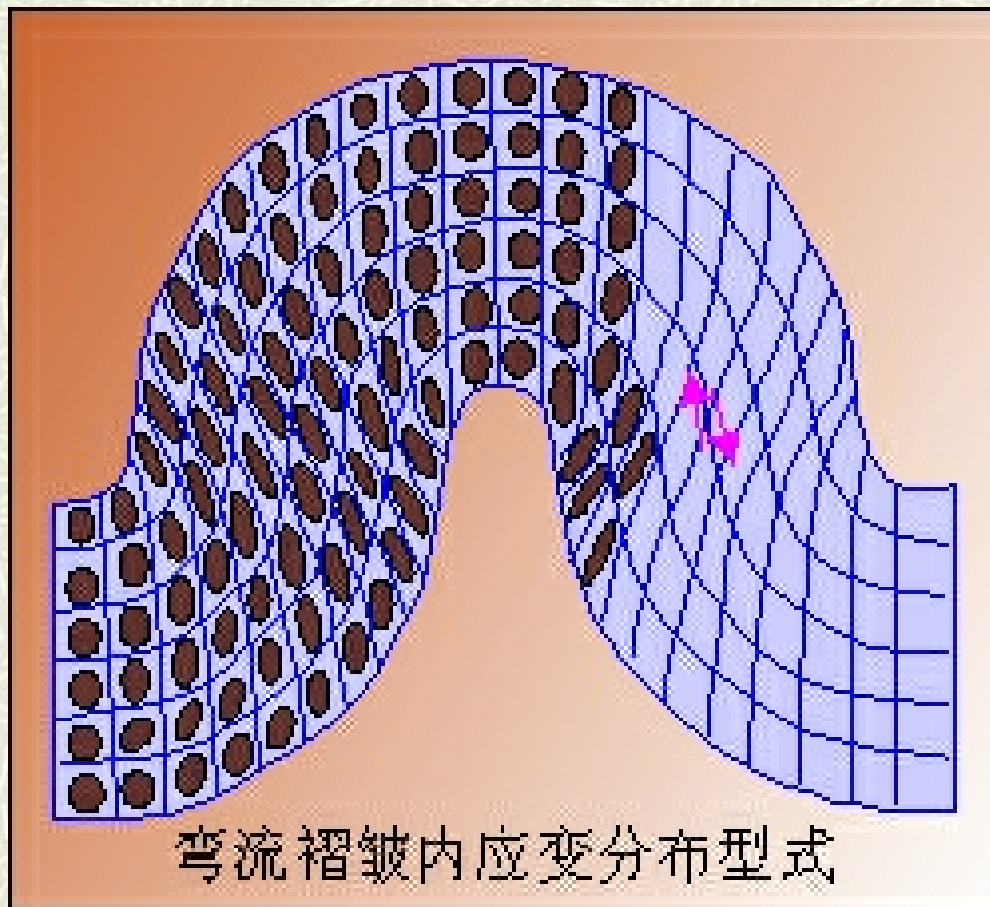
5.2.3.4 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造 弯流褶皱内的应变分布

- 平面应变
- IB 平行式，但无中和面
- 褶皱面为剪切面，相当“圆切面”（无应变）
- 正交剖面上， λ_1 方向呈“反扇形”，转折端处无应变，拐点处应变最强
- 线理在赤平投影图上的变位轨迹为小圆

5.2.3.4 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造 弯流褶皱内应变分布



- 注意与中和面褶皱作用应变分布形式（左上）的对比



5.2.3.5 纵弯褶皱层内的应变分布与小型构造

弯滑褶皱中的次级小型构造

- 韧性夹层中的小构造
 - 不对称小褶皱
 - 层间劈理
- 脆性层中的小构造
 - 层面擦痕（垂直于褶皱轴）
 - 层间破碎带
 - 转折端虚脱，可以形成鞍状脉和矿体
- 弯流作用发生在韧性高的层中，以发育反扇形板劈理（或褶劈理）为特征

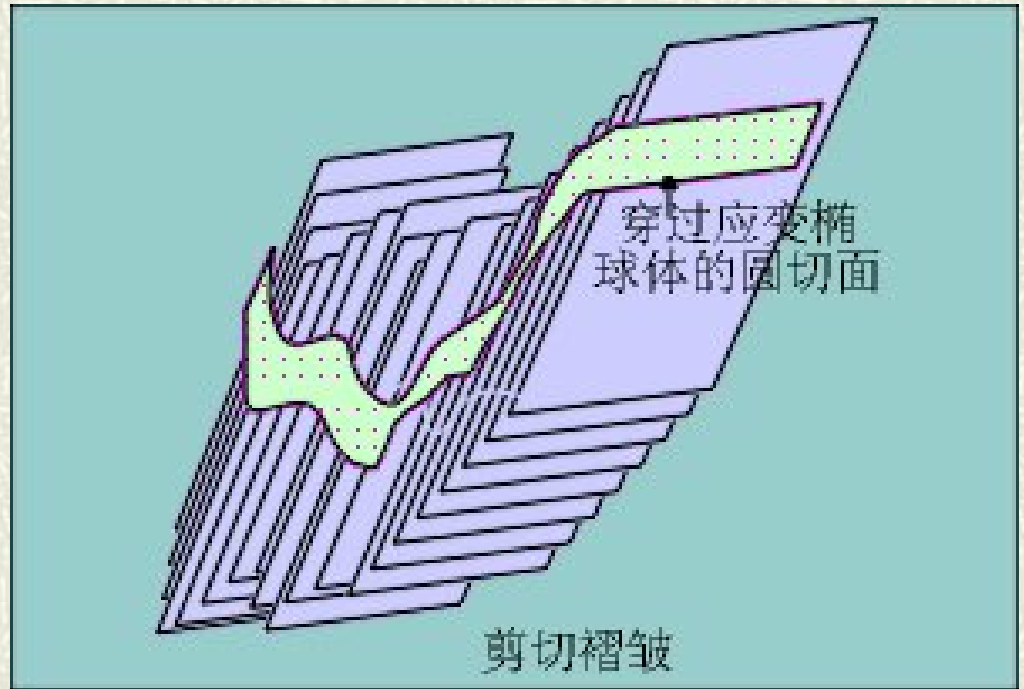
5.2.4

其它褶皱作用概述

- 剪切褶皱作用
- 横弯褶皱作用
- 底辟作用
- 柔流褶皱作用

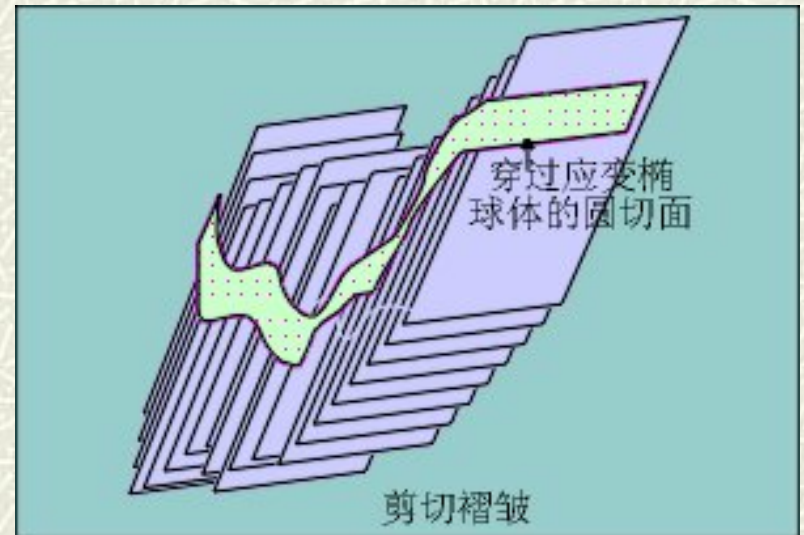
5.2.4.1 剪切褶皱作用

- 岩层被动弯曲，层面不具有力学意义上的主动性
- 发生在韧性较大的岩层中，如盐岩或韧性差极小的岩系（地壳深部环境）中



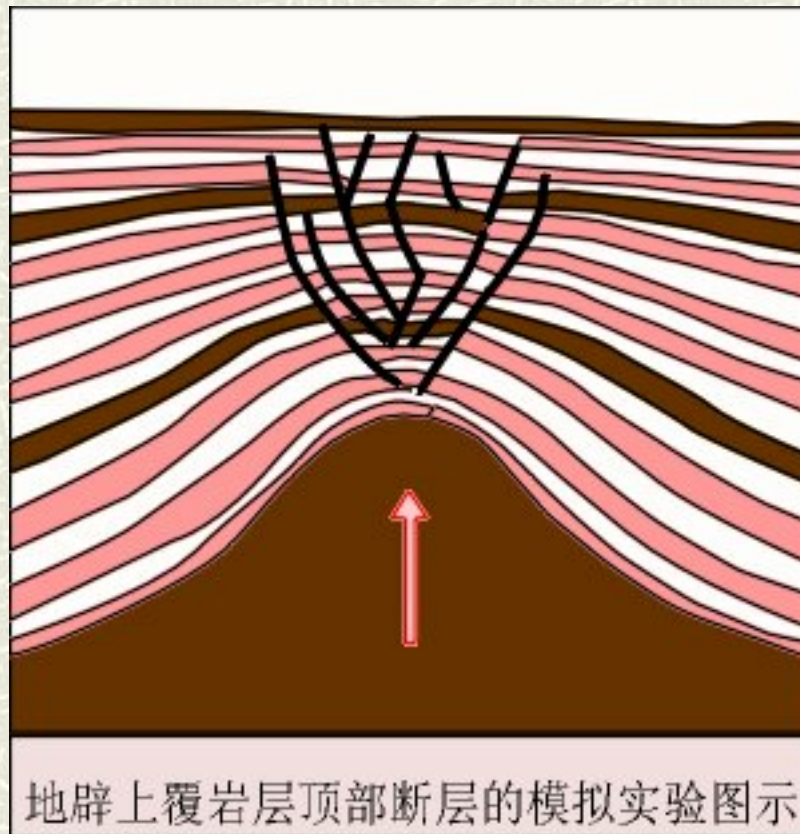
5.2.4.1 剪切褶皱特点

- 剪切面上每一点为平面应变
- 褶轴不一定平行于中间应变轴，只有当层面垂直于剪切方向时，二者才一致
- 无中和面
- 褶皱二翼剪切方向相反
- 属于II型相似式，平行于轴面方向上岩层厚度不变。顶加厚，翼减薄——并非由于物质流动引起
- 背形二侧 X Y 面成反扇形，可能形成反扇形劈理



5.2.4.2 横弯褶皱作用

- 作用力垂直于层面
- 特点：
 - 整体拉伸、无中和面
 - 韧性层形成IA顶薄型，但常在背斜顶部形成地堑，底劈顶部形成放射状或环状断裂系，基底断层上形成挠曲
- 同沉积褶皱
 - 一类特殊的横弯褶皱？



5.2.4.3 底辟作用

➤ 底辟构造成因

- 上下岩层密度倒置，力学不稳定产生失稳，岩石发生固态流动（由高应力处向低应力处流动）

➤ 底辟构造类型

- 盐丘、岩浆底辟等，可以成为良好的储油构造

➤ 造成盐丘失稳的原因

- 上覆层厚度不等；
- 差异剥蚀
- 盐层表面起伏不平
- 水平挤压

5.2.4.3 底辟作用

盐丘构造

➤ 盐核

- 直径 2 - 3 km，边界陡立，下延数km，内部发育轴面和枢纽陡立的复杂褶皱

➤ 围岩

- 顶部穹隆状隆起、发育正断层系，褶皱形态为1A型顶薄褶皱
- 外围的翼部地带向上卷起，甚至形成围绕盐核的向斜

5.2.4.3 底辟作用

底辟构造剖面图



德国汉诺威附近的盐丘构造剖面图
(据E.S.Hills修改)

5.2.4.4 柔流褶皱作用

- 固态流变条件下，岩石具有高韧性和低粘度，呈类似流体的粘滞性流动
 - 盐丘核部盐层的褶皱
 - 冰川中冰层的流动和砾石的变形——“灯盏石”
 - 肠状褶皱：高级变质岩、混合岩中常见的柔流褶皱



柔流褶皱作用的柔流褶皱

在物质的持续粘性流动中，既有层流，也有紊流，使得褶皱形态十分复杂。较简单层流条件下的柔流褶皱可看作剪切褶皱作用进行研究

本节要点

- 纵弯褶皱作用
 - 应力分布
 - 形态
 - 弯滑/弯流作用
 - 伴生构造
- 纵弯褶皱作用与横弯褶皱作用的区别

思考讨论题

- 自然界大部分褶皱是由纵弯褶皱作用形成的。从地壳变形的角度分析，这种现象反映了什么问题？
- 对于柔流褶皱作用，应该采用什么方法和手段对其进行描述和研究？