



运动速度对褶皱—冲断带的构造变形 样式的影响分析

——来自硅胶和石英砂组合模型的模拟启示

何文刚^{1, 2)}, 李生红¹⁾, 刘重庆³⁾, 赵远雯¹⁾, 骆忱¹⁾

1) 遵义师范学院土木工程系, 中国贵州遵义, 563006;

2) 里斯本大学科学院地质系, 葡萄牙里斯本, 1749-016;

3) 天津城建大学地质与测绘学院, 中国天津, 300384

内容提要: 运动速度与构造样式之间或许存在一定的内在联系, 充分认识它们之间的关系对理解自然界的构造变形演化过程具有十分重要意义。为此, 笔者等结合野外露头观察, 开展了脆—韧性结构条件下, 不同的变形速率对褶皱—冲断带的构造样式影响的物理模拟测试分析。结果表明: ① 高应形速率形成以前冲为主的构造样式, 中等应形速率形成以前冲和后冲为主的构造样式, 而低应形速率则形成以纯后冲为主的构造样式。② 构造变形样式的差异主要是物质内部的应力状态所决定的: 褶皱—冲断带的根带, 脆性层剪应力大于基底韧性层的剪应力, 形成以前冲断裂为主的构造样式; 而褶皱—冲断带的中段和前缘地区, 脆性层的剪应力和基底韧性层的剪应力较为接近, 形成后冲和对称性冲起构造为主。③ 构造地质体的变形速率很可能决定了其存在的物质状态。葡萄牙南部滨岸带的布丁构造和北美卡斯卡底古陆的纯后冲构造等特殊的构造样式极有可能是在差异的变形速率下形成。

关键词: 变形速率; 构造样式; 演化过程; 褶皱—冲断带; 物理模拟

自然界存在着气体、液体和固体 3 种物质状态, 从物质与运动的关系出发, 它们在时空下具有统一的成因属性, 那就是运动速度。运动速度的差异导致了物质存在的状态差异, 进而决定了其变形和演化过程。同时, 德博拉数 (Deborah number) 告诉我们, $De = t_{\text{松弛}} / t_{\text{观察}}$, 当 $De \ll 1$, 物质表现为液体行为; 当 $De \gg 1$, 物体表现为固体行为。如典型的韧性材料硅胶 SGM36, 其马克斯韦尔松弛时间不超过 1 s ($\eta/G = (3 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}) / (3 \times 10^5 \text{ Pa}) = 0.1 \text{ s}$)。因此, 假如 $De \gg 1$ 时, 弹性作用对物质变形的影响行为估计也被忽略 (Weijermars et al., 1993)。因此, 前人的研究进一步表明, 变形速率对自然界物质的变形样式具有极其重要的决定作用, 其重要性在构造变形研究中也例外。对此, 前人开展了运动速度对地貌、变形样式及演化过程的影响研究 (Rossetti et al., 2000, 2002; Gutscher et al., 2001; Smit et al., 2003; Bonini, 2007; Reiter et al., 2011; Gravelleau et al., 2012)。Rossetti 等 (2000)

造山楔汇聚速度对变形的影响研究表明, 快速的变形速率形成陡而窄的地貌, 缓慢的变形速率形成起伏低缓和宽的地貌。Reiter 等 (2011) 利用相邻块体之间的运动速度差异, 对弧形构造形成的几何特征进行了研究, 表明运动速度对变形具有重要的影响, 并解释了帕米尔弧形构造的可能成因。还有的学者研究表明, 挤压速度对褶皱—冲断带的变形样式具有重要的控制作用, 并且利用速度差异模型解释了北美卡斯卡底古陆的构造样式的成因 (Gutscher et al., 2001; Smit et al., 2003; Bonin, 2007)。尽管如此, 人们对变形速率决定构造样式的形成及演化的重视程度仍然不够, 也缺乏更为深入的物理模拟分析和探讨。

物理模拟技术是一发展 200 多年的变形分析手段, 对理解褶皱—冲断带的变形演化过程具有极其重要的构造物理学意义 (Hubbert, 1937; Gravelleau et al., 2012; Schreur et al., 2016; Butler et al., 2020)。同时, 在构造变形研究中已得到广泛应用

注: 本文为国家留学基金委资助项目 (编号: 201908520019)、贵州省科技厅资助项目 (编号: 黔科合基础-zk[2022]) 和遵义师范学院资助项目 (编号: 黔教合 KY[2022] 014 号) 的成果。

收稿日期: 2022-04-01; 改回日期: 2022-07-27; 网络首发: 2022-08-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.08.091

作者简介: 何文刚, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 主要从事构造地质研究; Email: hewengang123@aliyun.com。

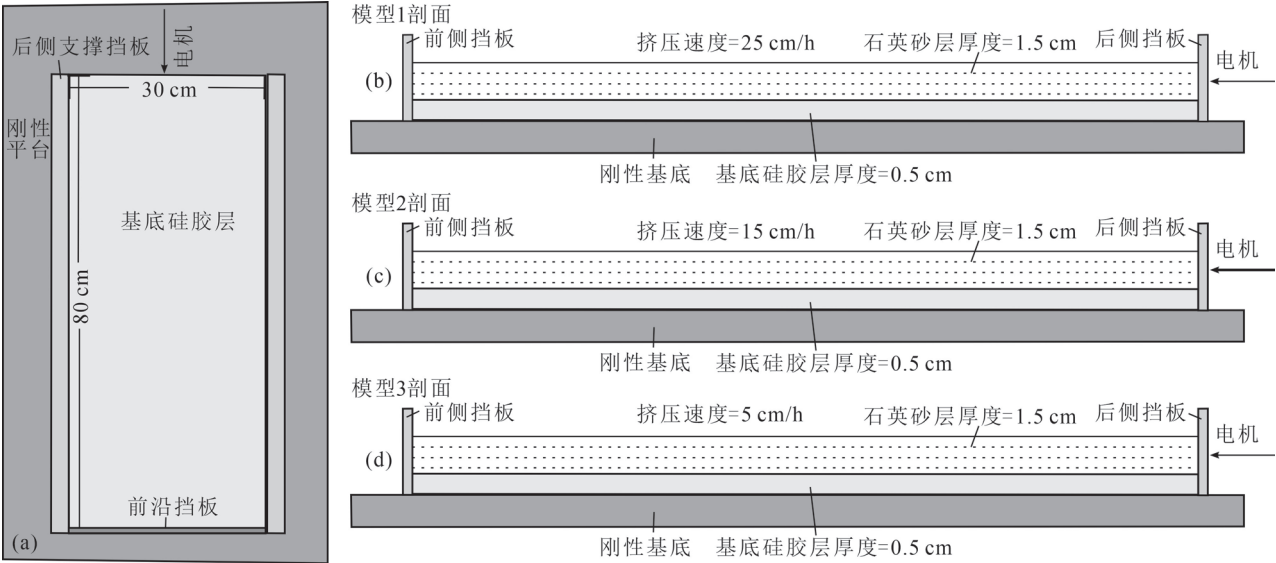


图 1 模型装置及结构：(a) 装置平面结构；(b)—(d) 分别为模型 1—模型 3 结构

Fig. 1 Model set up and structure: (a) the plane view of models; (b)—(d) the model 1, model 2 and model 3, respectively

(Davis et al. , 1983; Bonini, 2007; He Wengang et al. , 2018; Marques et al. , 2018; He Wengang, 2020)。为此,本研究在前人工作的基础上,以一定的脆韧性层厚度和地层流变学结构为基本特征,设计了 25 cm/h、15 cm/h 和 5 cm/h 3 组挤压速度差异模型,以进一步讨论变形速率对褶皱—冲断带构造样式及其演化过程的影响,为深入理解褶皱—冲断带的地壳物质的变形机制提供构造物理学证据。

1 模型设计

1.1 模型构建策略

地壳物质的脆性变形服从库伦破裂准则：
$$\tau = C_0 + \mu \sigma_n \tag{1}$$
 τ 为面的剪应力, C_0 为内聚力, μ 为内摩擦系数, σ_n 为正应力。

地壳韧性层的剪应力：
$$\tau_d = \eta \times \dot{\gamma} \tag{2}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{\frac{\Delta x}{\Delta y}}{t} = \frac{\frac{\Delta x}{t}}{\Delta y} = \frac{V}{\Delta y} \tag{3}$$

τ_d 为韧性层剪应力, η 为韧性的粘度, $\dot{\gamma}$ 为应形速率, ε 为应变, t 变形持续的时间, Δx 为水平方向的变化量, Δy 为垂直方向的变化量。

地壳物质的变形服从 Maxwell 材料模型,即粘弹性模型(Jaeger and Cook, 1969)。所以,在本研究中,模型主要是基于脆—韧性结构的挤压型变形,采

用三种不同的速度对具有软弱基底和上覆脆性变形的褶皱—冲断带的变形样式及其演化进行模拟研究。

1.2 模型构建

本研究的模型长、宽、和高分别为 80 cm、30 cm 和 20 cm(图 1 a)。所有实验在葡萄牙里斯本大学构造物理模拟实验室完成。所有模型的缩短量均为 30 cm。实验过程中应用高分辨率相机进行延迟拍照,并对实验结果进行洒水固结切片。每一组实验均进行了重复性验证。

(1)快速变形实验。模型 1,挤压速度为 25 cm/h,探讨高速度的挤压变形。基底硅胶厚度为 0.5 cm,上覆石英砂厚度为 1.5 cm(图 1b;表 1)。模型的两侧挡板应用硅油减小侧向摩擦力的影响。

(2)中等速度变形实验。模型 2,挤压速度为 15 cm/h,探讨中等速度的挤压变形(图 1c;表 1)。其余参数与模型 1 相同。

(3)低速变形实验。模型 3,挤压速度为 5 cm/

表 1 模型机构参数

Table 1 Model parameters

模型系列	挤压速度 (cm/h)	基底硅胶 厚(cm)	上覆石英 砂厚(cm)	长 (cm)	宽 (cm)	高 (cm)
模型 1	25	0.5	1.5	80	30	2
模型 2	15	0.5	1.5	80	30	2
模型 3	5	0.5	1.5	80	30	2

h, 探讨低速度的挤压变形(图 1d;表 1)。其余参数与模型 1 相同。

1.3 模型材料及相似性系数

松散的石英砂是目前模拟上地壳变形较理想的材料之一,已得到了广泛应用(Bonini, 2007; He Wengang et al., 2018)。实验中,使用的石英砂密度为 1600 kg/m³,内摩擦角 30°,内摩擦系数为 0.6,粒径为 0.3 mm。硅胶是模拟韧性变形较为理想的材料,在脆、韧性褶皱—冲断带模拟中得到了广泛应用(Smit et al., 2003; Graveleau et al., 2012)。在室温条件下,PDMS 硅胶粘度为 2.5×10⁴ Pa·s,密度为 965 kg/m³。模型的长度相似系数为 10⁻⁶,即模型长度 1 cm 代表实际 10 km。重力加速度相似系数为 1。变形速率的相似系数计算为:模型 1 的挤压速度为 1.38×10⁻⁵,对应自然界的实际变形速率为 8.9×10⁻⁸,相似系数为 155。类似,模型 2 和模型 3 的相似系数分别为 460 和 775(表 2)。

运动学和动力学相似性系数计算参照 Hubbert (1937, 1951)和 Weijermar 等(1993)。具体参数见表 2。

表 2 模型材料及相似性系数(据 Hubbert, 1937; Bonini, 2007)

Tabel 2 Model material and scaling
(from Hubbert, 1937; Bonini, 2007)

变量	符号	模型	实际	相似系数
长度(m)	<i>l</i>	10 ⁻³	1000	10 ⁻⁶
重力加速度	<i>g</i>	9.81	9.81	1
石英砂密度(kg/m ³)	ρ_b	1600	2600	0.62
内聚力	<i>c</i>	80	4.0×10 ⁷	2×10 ⁻⁶
硅胶密度(kg/m ³)	ρ_d	965	2200	0.44
粘度(Pa·s)	η	25000	10 ¹⁹	4.0×10 ⁻¹⁵
时间(s)	<i>t</i>	3600	5.6×10 ⁻¹¹	6.4×10 ⁻⁹
剪切应力(Pa)	τ	221	3.56×10 ⁸	6.2×10 ⁻⁷
模型 1 速度(m/s)	<i>V</i> ₁	1.38×10 ⁻⁵	8.9×10 ⁻⁸	155
模型 2 速度(m/s)	<i>V</i> ₂	4.1×10 ⁻⁵	8.9×10 ⁻⁸	460
模型 3 速度(m/s)	<i>V</i> ₃	6.9×10 ⁻⁵	8.9×10 ⁻⁸	775

2 模拟结果

2.1 模型 1 模拟结果

模型 1 为 25 cm/h 的高速度挤压变形。缩短量 30 cm,缩短率为 37.5%。形成的褶皱—冲断带宽度为 29.7 cm,前陆未变形区域宽度为 20.3 cm。在平面上形成了 5 条明显的箱状褶皱和一个幅度较小的褶皱。单个褶皱的最大宽度为 5 cm,最小宽度为 2 cm。褶皱—冲断带靠近支撑挡板的一侧,形成平直

的褶皱轴迹,但在褶皱—冲断带的前缘,形成约为弧形弯曲的褶皱轴迹。从平面形态特征上可以明显看出,从根带到前陆,褶皱轴迹的弧形特征变得更加明显(图 2a)。切片特征显示,在褶皱—冲断带的根带,形成巨厚的硅胶软弱层,硅胶抬升露出模型表面,相邻的脆性层形成倒转褶皱和前冲断裂。在褶皱—冲断带的中前缘,主要是形成冲起构造,并且冲起构造的前支产生两条前冲断裂(图 2b 和图 2c)。

2.2 模型 2 模拟结果

模型 2 为中等速度(15 cm/h)挤压变形。缩短量 30 cm,缩短率为 37.5%。形成的褶皱—冲断带宽度为 22.3 cm,前陆未变形区域宽度为 27.7 cm。在平面上形成了 6 条明显的前冲和后冲型褶皱。单个褶皱的最大宽度为 2.9 cm,最小宽度为 1 cm。在靠近挤压一段,也是形成与挤压一侧边界近似平行的褶皱轴迹。在远离挤压的前缘区域,形成弧形的褶皱轴迹,而且褶皱轴迹的曲率从褶皱—冲断带的根带到前陆地区变得越来越大。模型 2 与模型 1 相比,弧形褶皱的对称性要更为清晰一点。剖面特征显示,主要形成前冲和后冲断裂。靠近褶皱—冲断带的根带,主要是形成前冲断裂,但是到变形带的前缘地区,主要是形成后冲断裂为主(图 3)。

2.3 模型 3 模拟结果

模型 3 为低速(5 cm/h)挤压变形。缩短量 30 cm,缩短率为 37.5%。形成的褶皱—冲断带宽度为 30 cm,前陆未变形区域宽度为 20 cm。在平面上形成了 7 条明显的前冲和后冲型褶皱。单个褶皱的最大宽度为 4 cm,最小宽度为 2 cm。在靠近挤压一端,仍然是形成近似平直的褶皱轴迹,而在褶皱—冲断带的前缘,主要是形成弧形弯曲的褶皱轴迹(图 4a)。模型 3 与模型 1 相比,前缘构造带的褶皱弧形弯曲度比模型 1 的要更加明显,隆起的幅度也更大。模型 3 切片显示,形成倒转断裂、后冲断裂和前冲断裂(图 4b 和图 4c)。构造样式主要是形成以后冲断裂为主。模型 3 与模型 2 相比,仍然是褶皱数量比模型 2 多 1 条。前缘区域的弧形褶皱弯曲度比模型 1 和模型 2 均要大。

3 讨论

3.1 变形速率对构造样式的影响和控制作用

对比模拟结果,尽管 3 类模型均形成前冲断裂、后冲断裂和反转断裂及断层相关褶皱,但在构造样式上存在明显差异:高速度挤压变形,形成的褶皱—冲断带以前冲和冲起构造为主。前冲断裂位于褶

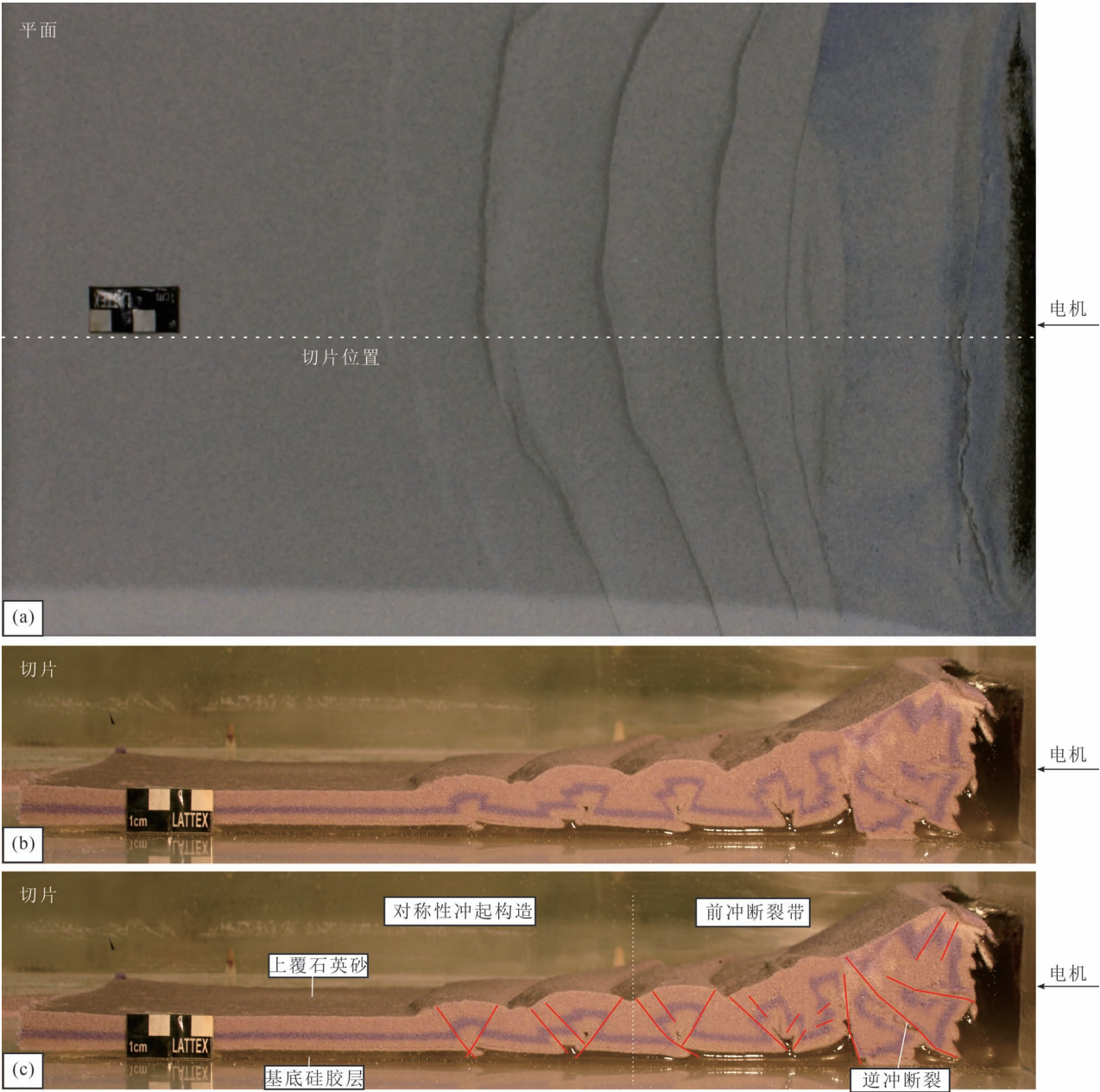


图 2 高速(25 cm/h)挤压变形样式:(a) 平面特征;(b) 原始模型切片;(c) 切片解释
Fig. 2 Deformation pattern of high velocity (25 cm/h): (a) plane characteristics ; (b) original model slice ;
(c) drawing interpretation)

皱—冲断带的根带,对称性的冲起构造位于变形带的前缘(图 5a)。而中等挤压速度形成前冲和后冲构造为主(图 5b),低速度的挤压变形,则形成的褶皱—冲断带以后冲构造为主(图 5c)。而且,高速挤压变形,形成的逆冲断裂倾角(最大值 86°)大于中等挤压速度和低速挤压变形的逆冲断裂倾角(最大值 65°)。最明显的特征是反转构造部分的倾角因挤压速度的减小,呈现明显的下降趋势(分别为 58°、54°和 11°)。高挤压速度,形成的前冲断裂较

为发育,但随着挤压速度逐渐减小,构造样式以前冲构造为主,并逐渐过渡到以后冲断裂为主,而且基底韧性层露出表面的规模和幅度也有所减小(图 5)。这表明,变形速率对构造样式的形成具有极为重要的控制作用。高速度使得变形具有近似库伦—冲断带楔的破坏效果。这与前人的模拟结果具有较大的相似性:在高汇聚速度下,形成的地貌陡而窄,而低汇聚速度则形成宽缓的地貌特征,或者是由于挤压速度差异导致了脆韧性地层的耦合程度和相对

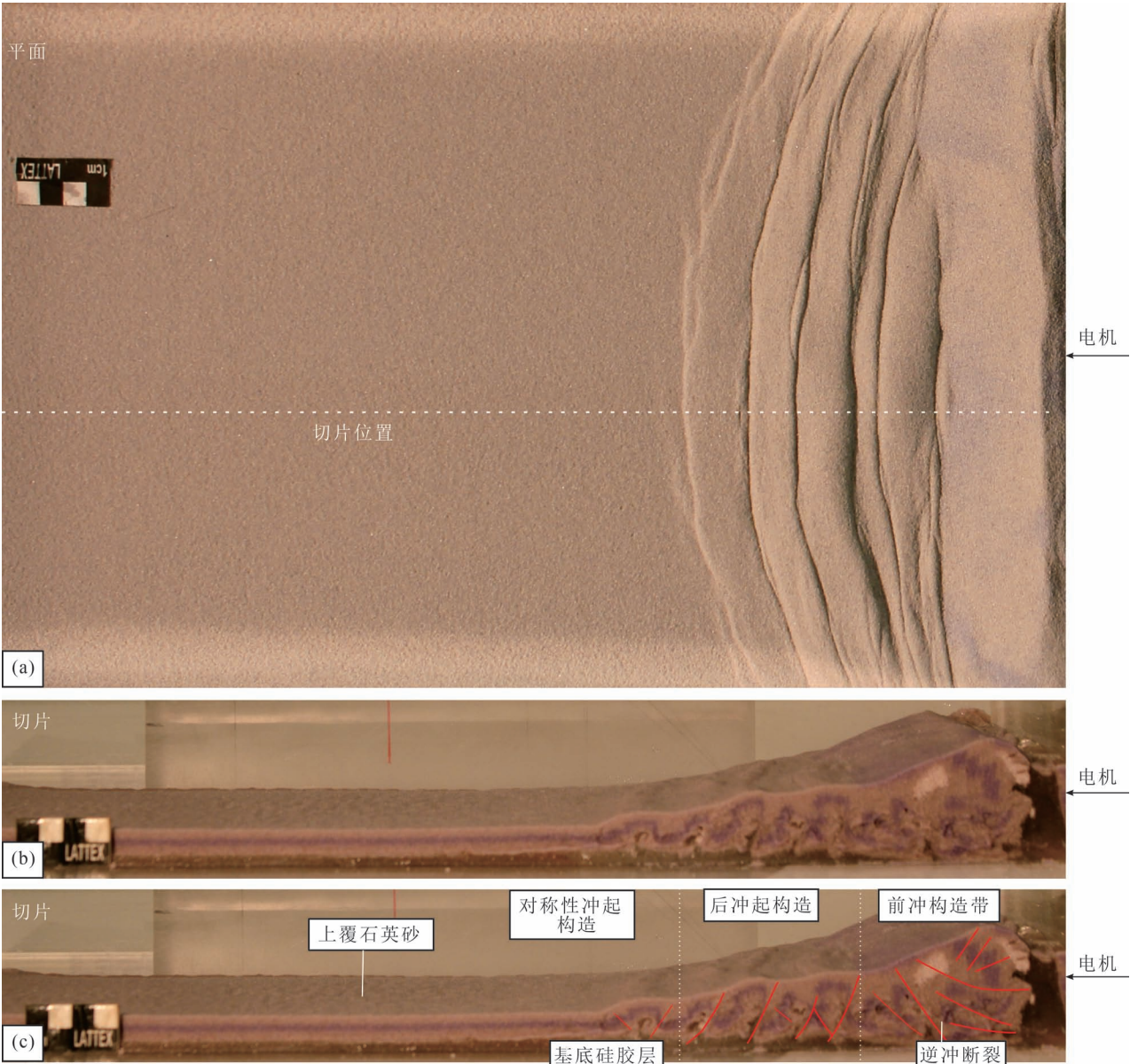


图 3 中等速度(15 cm/h)挤压变形样式:(a) 平面特征;(b) 原始模型切片;(c) 切片解释
Fig. 3 Deformation pattern of middle velocity (15 cm/h): (a) plane characteristics; (b) original model slice; (c) drawing interpretation

强度发生改变(Rossetti et al., 2000, 2002; Smit et al., 2003; Bonini, 2007)。尽管其初始状态一致,但是物质内部的动力学过程因应变时间的改变和物质的横向迁移,以及受力状态的改变等因素影响,使得变形样式具有一定的复杂性。

3.2 应力和应变分布关系

模拟结果揭示,应力状态是控制褶皱—冲断带变形的关键因素,是构造样式产生的根本原因。在初始状态,模型 1、2 和 3 韧性层的应变速率与剪应力关系如图 6a 所示,呈正相关关系。在 Maxwell 模

型中,剪应力与挤压速度的关系显示:所有模型的脆韧性层的剪应力均为 221 Pa,与速度无关。但韧性层的变化不一样,随着挤压速度的增大,剪应力增大。模型初始受力状态可知,模型 1 的脆性层剪应力小于其韧性层的剪应力,而模型 2 和模型 3 的脆性剪应力则大于其韧性层的剪应力(图 6b)。

变形 30 cm 的应力与应变特征表现为:在反转和前冲构造带,模型 1 的脆性层剪应力大于模型 2 和模型 3 的脆性层剪应力;模型 3 的韧性层剪应力则要大于模型 2 和模型 1 的韧性层剪应力(图 7a)。

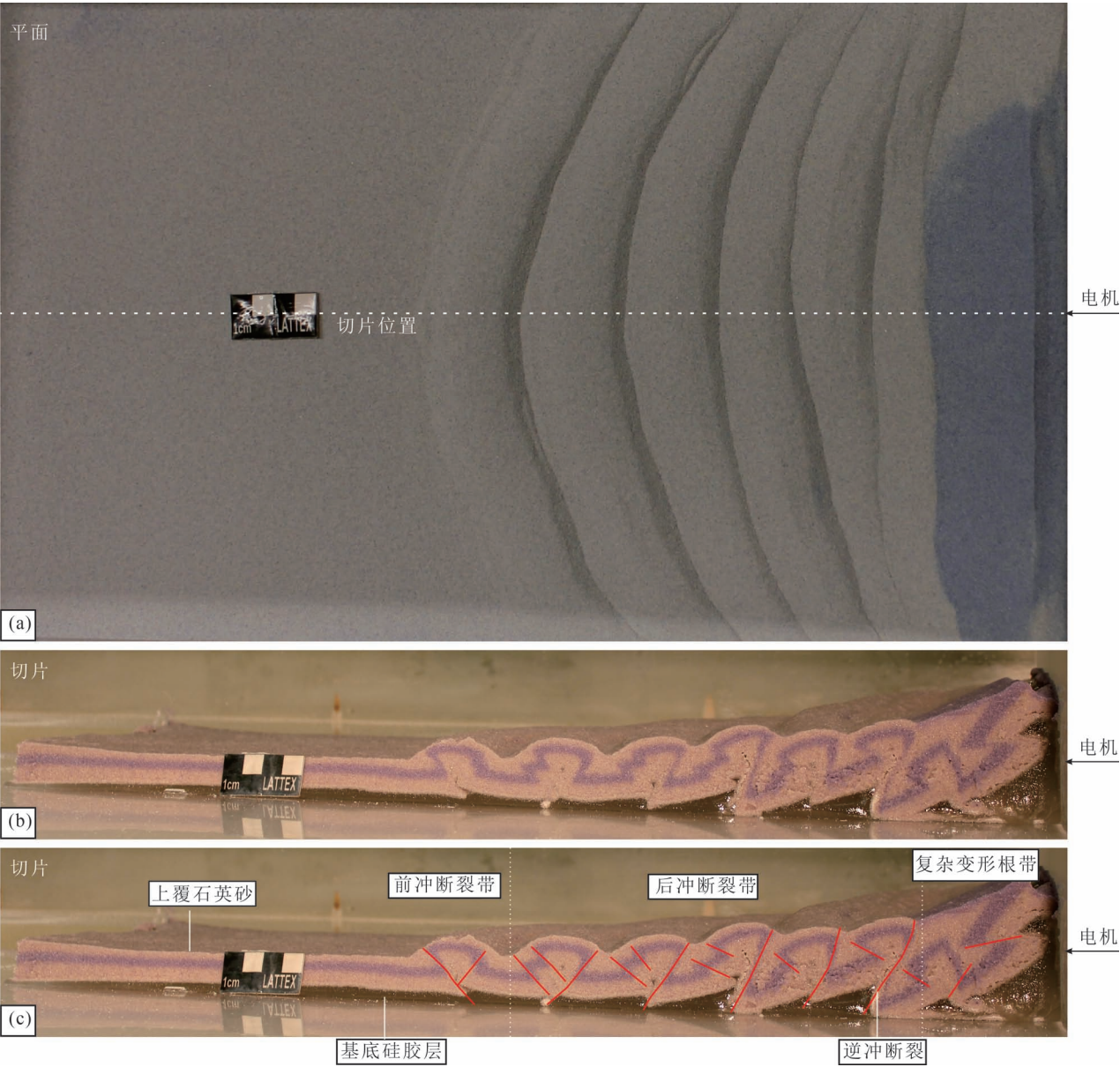


图 4 低速(5 cm/h)挤压变形样式: (a) 平面特征; (b) 原始模型切片; (c) 切片解释
Fig. 4 Deformation pattern of low velocity (5 cm/h): (a) plane characteristics; (b) original model slice; (c) drawing interpretation

在后冲构造带,模型 2 的剪应力大于模型 1 的剪应力,模型 1 的剪应力又大于模型 3 的剪应力(图 7b);在对称性冲起构造带,剪应力表现为模型 1 大于模型 3,模型 3 大于模型 2(图 7c)。

以上模拟结果表明,初始状态应力特征决定了构造样式的发展趋势,模型 1 的脆性剪应力始终比较大,使得变形更多表现为具有库伦冲断楔的变形行为。但是随着变形的进一步扩展,物质在横向迁移的过程中,会导致应力和应变状态发生改变,形成差异的构造样式。同时模拟结果进一步揭示,靠近

根带的基底韧性层剪应力越大,越有利于褶皱—冲断带的中段产生后冲构造,而基底剪应力越小,则该区域形成的构造样式以前冲为主(图 7a)。后冲构造发育的位置,脆性剪应力和韧性层剪应力数值变化不大。有关这一成果性认识在前人的研究中已有相关论述(Bonini, 2007)。本文研究成果与早期的褶皱—冲断带成因理论具有较大的相似性(Davis et al., 1983)。但本文从变形速率对构造样式的影响模拟探讨,揭示出变形速率的确是控制构造样式产生的一个极为关键控制因素,其本质上是构造变形

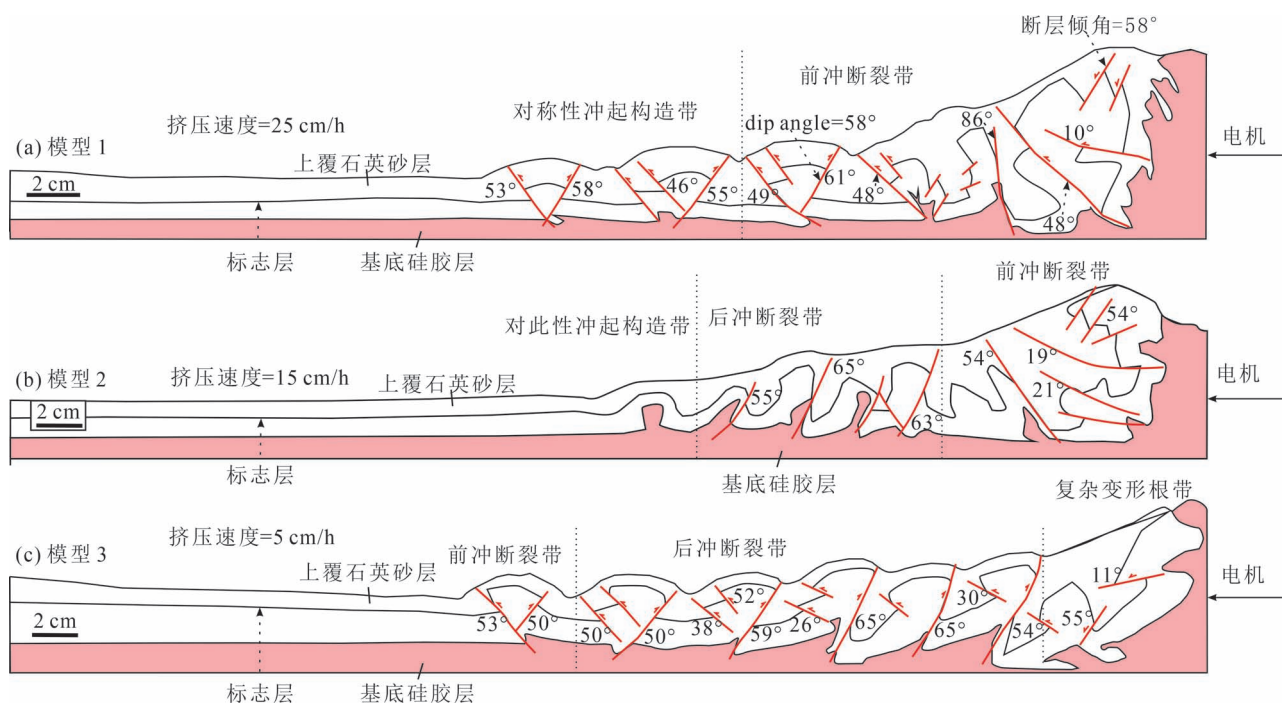


图 5 变形样式及逆冲断裂特征对比：(a) 高速挤压变形；(b) 中等速度挤压变形；(c) 低速挤压变形)
Fig. 5 Comparison of deformation patterns and thrust faults: (a) deformation of high speed compression;
(b) deformation of medium speed compression; (c) deformation of Low speed compression

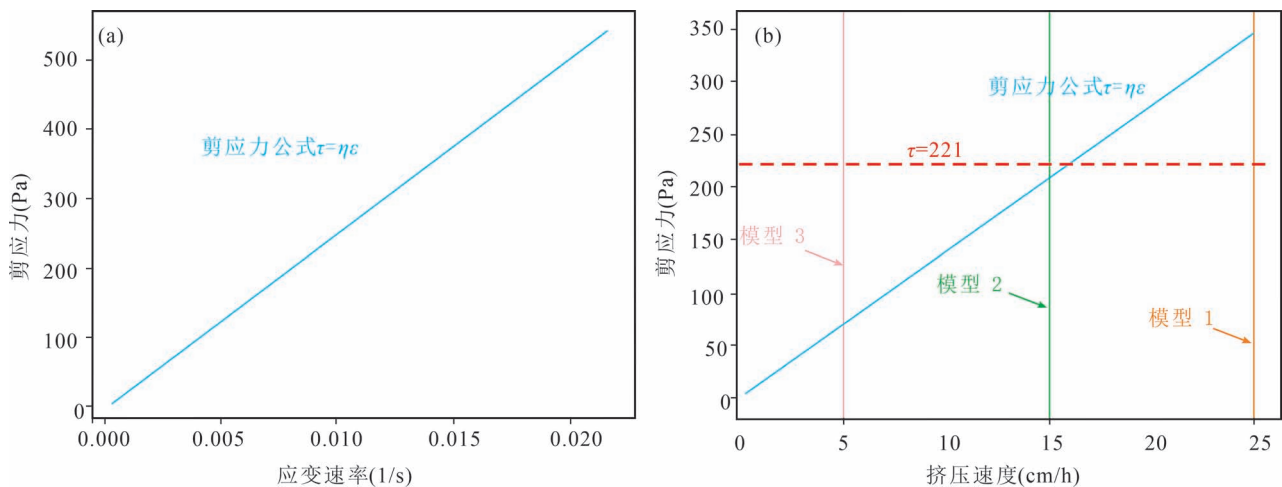


图 6 模型的初始受力状态分析：(a) 剪应变与剪应力之间的变化关系；(b) 变形速率与剪应力之间的变化关系
Fig. 6 Analysis of the initial stress state of the model: (a) the relationship between shear strain and shear stress;
(b) relationship between deformation rate and shear stress

速率的变化导致了地壳物质应力状态发生了改变。

3.3 褶皱—冲断带变形演化过程

不同速度控制下的褶皱—冲断带变形演化过程,在整体上是一致的,都是形成向前陆方向逐渐扩展的递变层序。形成根带倒转和前冲构造、前冲或后冲构造,一直到前缘的对称性冲起构造。但是,由于每一个系列模型的变形速率不同,变形演化的过

程具有一定的差异。高应形速率的模型 1 主要是首先形成前冲构造,然后再形成冲起构造。中等应形速率的模型 2 主要是形成前冲和后冲结合的振荡型层序,而低变形速率的模型 3 主要是形成后冲型构造(图 5)。

褶皱—冲断带的扩展过程与构造的抬升、剥蚀、加载与卸载、地层的几何特征及流变学结构具有一

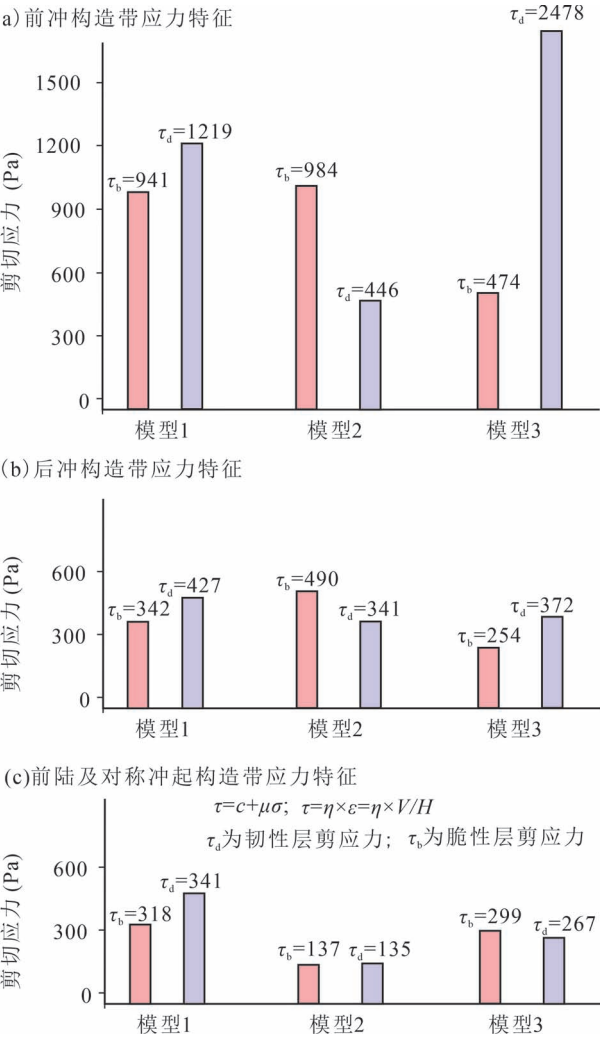


图 7 缩短量 30 cm 时不同构造带的剪应力特征: (a) 模型 1; (b) 模型 2; (c) 模型 3

Fig. 7 Shear stress characteristics of different domains with a shortening of 30 cm: (a) model 1; (b) model 2; (c) model 3)

定的关系 (Bonini, 2007; Graveleau et al., 2012)。本文的研究表明,变形速率对褶皱—冲断带的构造样式具有极其重要的影响,但也许不是演化过程的唯一决定因素。

3.4 变形速率决定构造样式产生实例

3.4.1 葡萄牙南部海岸布丁构造和褶皱样式

在滨岸带,为什么看到海水在波动而没有看到岸边的岩石在流动,其原因可以用德博拉数 De 进行回答。因为我们的观察时间远远大于物质内部变形所需的时间,导致观察者可以看到流动的海水不断地拍打着岸边的沙滩,而没有观察到海岸岩石在流动,是因为岩石的变形松弛时间远大于观察时间,导致岩石表现为固体状态。这内在的本质属性就是

变形速率的问题。因此,在时空尺度下,物质的变形速率决定了其运动的属性,也就影响了其变形演化过程。

变形速率决定了构造样式的产生。海浪运动过程中,由于波浪底部的摩擦阻力,导致其运动的速度越来越慢,而且在其波长一定的条件下,因侧向变形速率的差异,形成了岸边物质堆积形态与海浪波长相似的几何特征,最后形成了典型的布丁构造 (图 8)。构造带中产生的褶皱和逆冲断裂的数量主要是由物质自身的厚度、弹性、塑性、粘性 (即能干性) 所决定的。以上两个原则对自然界所有物质都是适应的 (Fernando, 2021 年 9 月 10 日野外交流)。

前人的物理模拟进一步揭示,变形速率的差异是导致地壳产生差异构造样式的内在本属性。

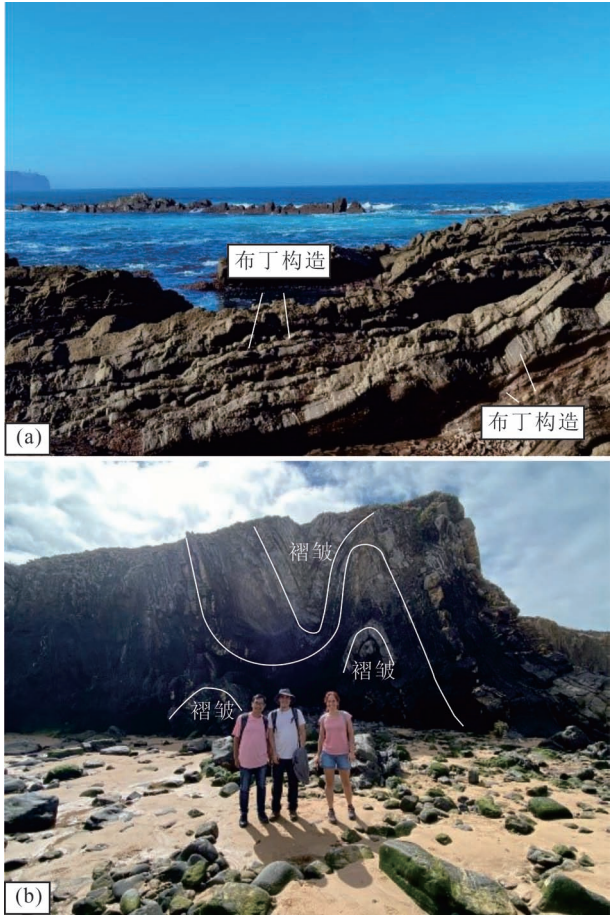


图 8 运动速度控制下形成的复杂构造样式: (a) 葡萄牙南部埃什皮谢尔角海岸布丁构造; (b) 葡萄牙里斯本南部多个褶皱叠加现象

Fig. 8 Complex structural style was formed by the control of movement velocity: (a) pudding structure along the coast of Lighthouse Cape Eshpichel in southern; (b) superimposition of multiple folds in the south of Lisbon, Portugal

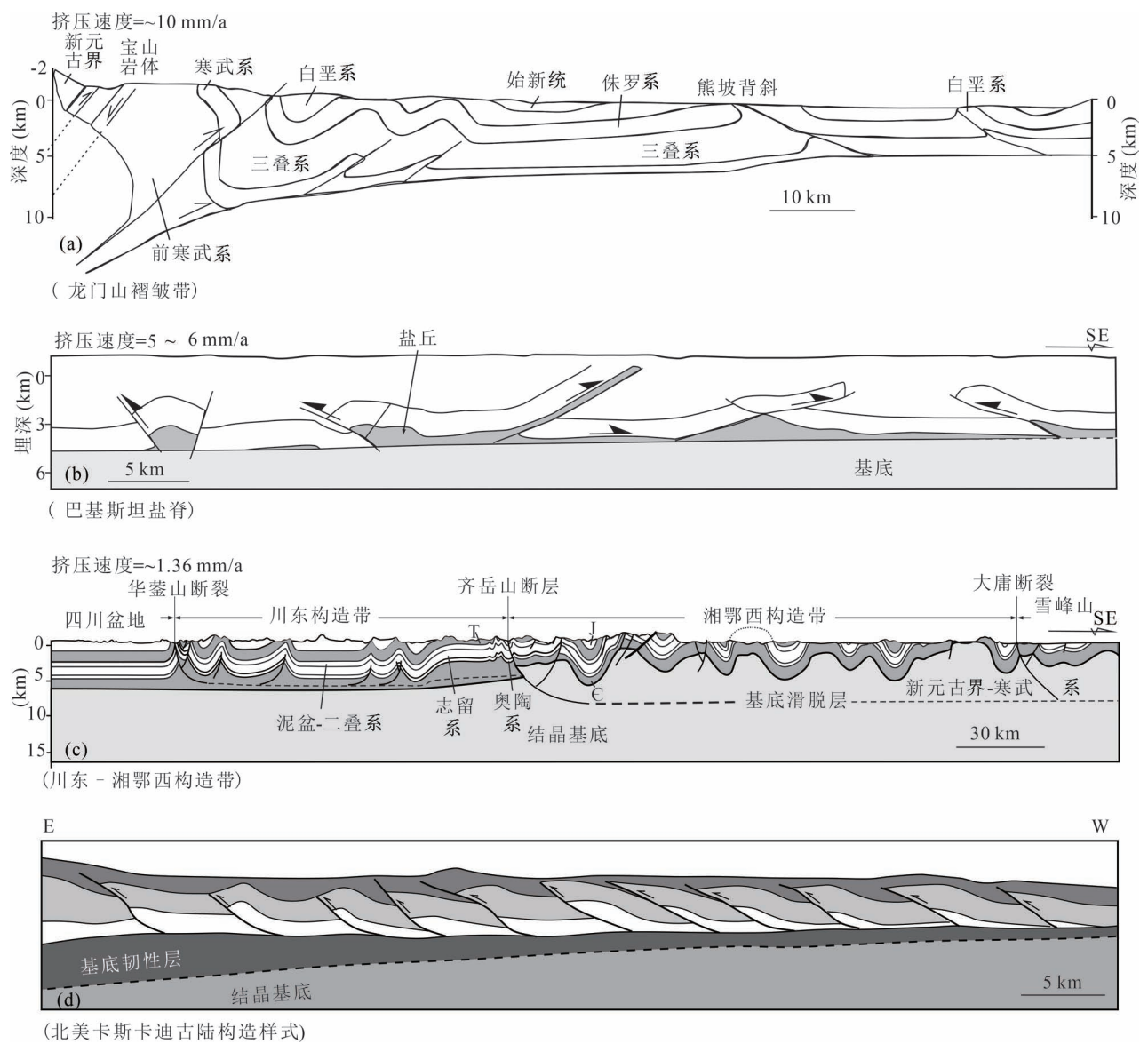


图 9 不同挤压速度下的构造变形样式实例: (a) 龙门山逆冲褶皱带, Burchfiel et al. , 2008; (b) 巴基斯坦盐脊, Smit et al. , 2003; Bonini, 2007; (c) 川东褶皱带, He Wengang et al. , 2018; (d) 北美卡斯卡迪古陆构造样式, Gutscher et al. , 2001; Smit et al. , 2003; Bonini, 2007; Zhou Chao et al. , 2016)

Fig. 9 Examples of tectonic deformation patterns under different velocities: (a) thrust fold belt in Longmen Mountains; Burchfiel et al. , 2008; (b) salt ridge in Pakistan; Smit et al. , 2003; Bonini, 2007; (c) fold- and thrust- belt in Eastern Sichuan; He Wengang et al. , 2018; (d) Structural styles of the North American Cascadia wedge; Gutscher et al. , 2001; Smit et al. , 2003; Bonini, 2007)

Guscher 等(2001)和 Bonini(2007) 的物理模拟结果同样揭示,由于差异的运动速度,导致板块汇聚时产生明显不同的变形样式,并进一步解释了卡斯卡迪古陆极为罕见的纯后冲构造样式的形成可能与变形速率有关。

3.4.2 龙门山、巴基斯坦盐脊和川东构造带

高变形速率如印度与亚洲的碰撞形成的龙山逆冲断裂,形成靠近挤压带的前冲断裂和靠近挤压边

界的前缘褶皱(图 9a)。前人研究表明,印度与亚洲的碰撞速度在 $10 \sim 20 \text{ mm/a}$ (Aitchison et al. , 2007; 何文刚等, 2021),这表明快速的俯冲在青藏高原周缘会形成广泛分布的前冲断裂,这已得到了地球物理资料的证实(Gao Rui et al. , 2016)。

中等变形速率的构造如巴基斯坦盐脊,其变形持续时间为 5 Ma,缩短量为 $25 \sim 30 \text{ km}$ (Smit et al. , 2003; Burbank and Beck, 1989)。则平均每年的缩

短量为 5~6 mm。该区域基底蒸发岩发育,形成了前冲、后冲和对称性的冲起构造(图 9b)。

低应变速率如川东构造带,其缩短量(缩短率 20%)约 136 km(Yan Danping et al., 2003; 梅廉夫等, 2010)。根据模拟验证,每年的缩短量为 1.36 mm,是有可能形成现今的构造样式的(He Wengang et al., 2018)。而且,该区形成的纯后冲断裂和广泛分布的低缓箱型褶皱极有可能与低变形速率紧密相关(Zhou Chao and Zhou Jianxun, 2022; 图 9c)。同理,北美卡斯卡底古陆的纯后冲构造的形成极有可能与法拉龙板块与北美板块汇聚时的低变形速率有关(图 9d)。

以上龙门山、巴基斯坦盐脊、川东构造带和北美卡斯卡迪等实例,均具有基底韧性层和上覆脆性结构。如是地层结构和其它因素影响,会造成褶皱的波长、断裂的发育模式、地层的剥蚀和抬升等一系列较为复杂的变形样式及演化过程。但本研究重点只是从一级尺度上探讨变形速率对构造样式的影响,并揭示变形速率是影响地壳变形及其演化的一个极为关键的控制因素,应引起足够的重视。自然界的构造变形是一复杂的运动学和动力学过程。因此,本研究仅限于相同流变学结构条件下,地壳物质的变形速率对构造变形及演化的控制,至于其它控制因素的影响及其制约,还有待于后续进一步的深入研究和探讨。

4 结论

笔者等在前人研究的基础上,结合野外地质考察,通过 3 组不同变形速率的基底韧性和上覆脆性层组合的结构模型,对变形速率对构造样式的影响及演化进行了物理模拟分析和探讨,得出如下结论和认识:

(1) 高应形速率主要是形成前冲断裂为主的构造样式,中等应形速率形成以前冲和后冲式的构造为主,而低应形速率则形成以纯后冲为主的构造样式。

(2) 变形速率对构造样式的影响,其本质是由于在构造运动中,地壳物质内部的应力状态发生了改变:在褶皱—冲断带的根带,形成以前冲断裂为主的构造样式,其脆性剪应力均比较大,而且大于基底韧性层剪应力。但当地壳物质内部的脆、韧性层各自的剪应力比较接近时,可以由前冲构造向后冲和对称性的冲起构造转化。

(3) 构造地质体的变形速率与其构造样式紧密

相关,变形速率决定了其存在的状态。葡萄牙南部滨岸带的布丁构造、龙门山褶皱带、巴基斯坦盐迹、川东褶皱带和北美卡斯卡底古陆的纯后冲构造等差异的变形样式及演化均是在特殊的变形速率状态下形成的。总之,变形速率极有可能是决定自然界物质存在状态的一个十分重要的本质属性,值得深入研究和探讨。

致谢:本研究是在里斯本大学 Fernando Ornelas Marques, Filipe M. Rosas, Joao C. Duarte 3 位教授的帮助下完成的。向他们的辛勤付出表示衷心的感谢。感谢审稿专家和中国石油大学(北京)余一欣教授对论文的质量提高提出了宝贵建议。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

何文刚, 罗伟, 冯伟平, 袁余洋. 2021. 特提斯构造域典型构造特征及其控制因素探讨—以物理模拟研究成果为例. 科学技术与工程, 21(1): 68~76.

梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 沈传波, 凡元芳. 2010. 湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形:来自裂变径迹和平衡剖面的证据. 地球科学(中国地质大学学报), 35(2): 161~174.

Aitchison J C, Ali J, Davis A. 2007. When and where did India and Asia collide? *Journal of Geophysical Research*, 112(B5): 1~19.

Bonini M. 2007. Deformation patterns and structural vergence in brittle—ductile thrust wedges: An additional analogue modelling perspective. *Journal of Structural Geology*, 29: 141~158.

Burbank D W, Beck R. A. 1989. Early Pliocene uplift of the Salt Range; temporal constraints on thrust wedge development, northwest Himalaya, Pakistan, in *Tectonics of the Western Himalayas*, edited by L. L. Malinconico and R. J. Lillie, Special Paper Geology Society American, 232: 113~128.

Butler R W H, Bond C E, Cooper M A. 2020. Henry Cadell's 'Experimental researches in mountain building': their lessons for interpreting thrust systems and fold—thrust structures. *Geological Society, London, Special Publications*, 490.

Burchfiel B, Royden L, Van Der H R, Hager B. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *Geological Society of America Bulletin*, 118: 4~11.

Davis D, Suppe J, Dahlen F. 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88: 1153~1172.

Graveleau F, Malavieille J, Dominguez S. 2012. Experimental modelling of orogenic wedges: A review. *Tectonophysics*, 538~540: 1~66.

Gutscher M, Klaeschen D, Flueh E, Malavieille J. 2001. Non-Coulomb wedges, wrong-way thrusting, and natural hazard in Cascadia. *Geology*, 29(5): 379~382.

Gao Rui, Chen Chen, Wang Haiyan, Lu Zhanwu, Brown L, Dong Shuwen, Feng Shaoying, Li Qisheng, Li Wenhui, Wen Zhongping, Li Feng. 2016. SINOPROBE deep reflection profile reveals a Neo-Proterozoic subduction zone beneath Sichuan Basin.

Earth and Planetary Science Letters, 454: 86~91.

He Wengang, Zhou Jianxun, Yuan Kang. 2018. Deformation evolution of Eastern Sichuan—Xuefeng fold—thrust belt in South China: Insights from analogue modelling. *Journal of Structural Geology*, 109: 74~85.

He Wengang. 2020. Influence of mechanical stratigraphy on the deformation evolution of fold—thrust belts: Insights from the physical modeling of Eastern Sichuan—Western Hunan and Hubei, South China. *Journal of Earth Science*, 31(4): 795~807.

He Wengang, Luo Wei, Feng Weiping, Yuan Yuyang. 2021&. Deformation patterns and controlling factors of the Tethys Classical tectonic domain: Review from the physical modeling results. *Science Technology and Engineering*, 21(1):68~76.

Hubbert M K. 1951. Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Bulletin of the Geological Society of America*, 62(4): 355~372.

Hubbert M K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Bulletin of the Geological Society of America*, 48(10): 1459~1519.

Jaeger J C, Cook N G W. 1969. *Fundamentals of rock mechanics*. Mathuen, London. 515.

Marques F O, Mandal N, Ghosh S, Ranalli G, Bose S. 2018. Channel flow, tectonic overpressure, and exhumation of high-pressure rocks in the Greater Himalayas. *Solid Earth*, 9: 1061~1078.

Mei Lianfu, Liu Zhaoqian, Tang Jiguang, Shen Chuanbo, Fan Yuanfang. 2010&. Mesozoic intra-continental progressive deformation in Western Hunan—Hubei—Eastern Sichuan Provinces of China: Evidence from apatite fission track and balanced cross-section. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 161~174.

Reiter K, Kukowski N, Ratschbacher L. 2011. The interaction of two indenters in analogue experiments and implications for curved fold-and-thrust belts. *Earth and Planetary Science Letters*, 302: 132~146.

Rossetti F, Faccenna C, Ranalli G, Storti F. 2002. Convergence rate-dependent growth of experimental viscous orogenic wedges. *Earth and Planetary Science Letters*, 178: 367~372.

Rossetti F, Faccenna C, Ranalli G. 2000. The influence of backstop dip and convergence velocity in the growth of viscous doubly-vergent orogenic wedges: insights from thermomechanical laboratory experiments. *Journal of Structural Geology*, 24: 953~962.

Schreurs G, Buiter S J H, Boutelier J, Burberry G, Burberry C, Callot J P, Cristian Cavozi C, Cerca M, Chen Jianhong, Cristallini E, Alexander R. Cruden A R, Cruz L, Daniel J M, Poian G D, Garcia V H, Gomes C J S, Grall C, Guillot Y, Guzman C, Hidayah T N, Hilley G, Klinkmüller M, Koyi M A, Lu C Y, Maillot B, Meriaux C, Nilfouroushan F, Pan C C, Pillot D, Portillo R, Rosenau M, Schellart W P, Schlische R W, Take A, Vendeville B, Marine Vergnaud M, Vettori M, Wang S H, Withjack M O, Yagupsky D, Yamada Y. 2016. Benchmarking analogue models of brittle thrust wedges. *Journal of Structural Geology*, 92: 116~139.

Smit J, Brun J, Sokoutis D. 2003. Deformation of brittle—ductile thrust wedges in experiments and nature. *Journal of Geophysical Research*, 108(B10), 2480, (9): 1~18.

Weijermars R, Jackson M P A, Vendeville B C. 1993. Rheological and tectonic modeling of salt provinces. *Tectonophysics*, 217(1~2): 143~174.

Yan Danping, Zhou Meifu, Song Honglin, Wang Xinwen, Malpas J. 2003. Origin and structural significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361: 239~254.

Zhou Chao, Zhou Jianxun. 2022. Relationship between Lateral/Basal Shear Stress Ratio and Structural Vergence of Thrust Wedges: Results from Analogue Modeling and Implications for the Origin of Eastern Sichuan—Xuefeng Fold—Thrust Belt in South China. *Tectonic*, 2: 1~54

Effect of deformation velocity on the deformation patterns of fold-and-thrust belt

——Insights from analogue modellings with brittle—silicone layers

HE Wengang^{1,2)}, LI Shenghong¹⁾, LUI Chongqing¹⁾, ZHAO Yuanwen¹⁾, LUO You¹⁾

1) College of Engineering and Technology, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou, 563002, China;

2) Instituto Dom Luiz, Faculdde de Ciencias, University de Lisboa, Lisboa, 1749-016, Portugal;

3) School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin, 300384, China

Objective: There may be a closed relationship between the velocity and the structural style. It is an important material attribute, which is of great significance to understand the deformation and evolution process of nature.

Methods: Therefore, combined with field outcrop observation, this study carried out physical simulation test and analysis of different deformation rates of fold —thrust- belt.

Results: The results show that: ①High velocity forms a structural style dominated by forward thrust faults, medium velocity forms a structural style dominated by forward thrust fault and backward thrust fault, while low velocity forms a structural style dominated by pure backward thrust fault. ②The difference of structural deformation patterns is mainly determined by the internal stress state of the rock; the forward thrust fault was developed in the hinterland of the fold -and- thrust belt, and the shear stress of the brittle layer is greater than that of the basal

ductile layer, while in the middle and front domains, the shear stress of the brittle layer is close to that of the basal ductile layer, mainly forming back thrust and symmetrical pop-up thrust structures. ③The deformation rate of tectonic geological body may determine its existing state.

Conclusions: The pudding structure of the coastal area in the south of Portugal and the dominating back thrusts in Cascadian-type margins in North America are likely to be formed under different deformation rates.

Keywords: deformation velocity; structural style; evolution process; fold -and- thrust belt; analogue modelling

Acknowledgments: We are grateful to the China Scholarship Council (No. 201908520019) for providing scholarship to study in my postdoctoral program in university of Lisbon. This study was supported by the Qian Ke He Ji Chu (Nos. ZK [2022] Yi Ban 571 and Qian Jiao He KY [2022]014). We thank Profs. Fernando, Filip, Joao, and ZHOU Jianxun, they helped and guided me selflessly.

First author: HE Wengang, male, was born 1982, associate professor, mainly engaged in structural geology by analogue modelling; Email: hewengang123@aliyun.com

Manuscript received on: 2022-01-20; Accepted on: 2022-07-06; Network published on: 2022-07-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 07. 051 **Edited by:** LIU Zhiqiang

