文章编号: 1006-6616 (2014) 04-0455-14

叠加褶皱研究进展综述

陈 龙^{1,2},施 炜²

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083;

2. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081)

摘 要:叠加褶皱作为地壳构造变形中一种常见的地质现象,对于确定多期变形和 构造运动期次,探讨构造演化历史以及内外生矿床的空间分布、形成与变形特征均 有重要研究意义。在回顾叠加褶皱研究历史与近年来取得的主要进展基础上,系统 地总结了叠加褶皱几何学与运动学特征,指出叠加褶皱主要有纵弯褶皱作用、横弯 褶皱作用及剪切褶皱作用3种成因机制。在此基础上,选取典型的叠加褶皱,剖析 了其构造样式及形成机制,并探讨了叠加褶皱研究的难点与可行研究方法。 关键词:叠加褶皱;构造样式;构造应力场;成因机制;构造模拟

中图分类号: P542⁺.2 文献标识码: A

0 引言

地壳在构造变形过程中,主要表现为构造联合和构造复合两种构造叠加方式^[1-2]。构造 联合是同地同时发生的2个或2个以上应力场、应变场、位移场及有关构造的叠加,最为典 型的区域性构造联合叠加^[1],见于中扬子北缘的雪峰山构造带与大巴山弧形构造带共同构 成"双弧构造"^[3-5];而构造复合是同地不同时的应变场、位移场及有关构造的叠加,是地 壳变形中最为常见的构造变形现象之一,典型的构造复合叠加现象有断裂交切、面理线理的 穿插、褶皱的叠加干扰等^[1]。复合构造很好地记录了构造变形历史,一直是构造地质学中 重要研究内容之一^[2,6-7]。叠加褶皱作为复合构造中一种重要的表现形式^[3],广泛发育于具 有多期次强烈变形的变质岩区^[8],在沉积岩区也有发育^[3,9-11]。一般地,叠加褶皱是由于已 褶皱的岩层或岩石再次或多次褶皱变形而形成的褶皱综合形态^[11],其变形标志是先期褶皱 轴面再次发生褶皱变形,或者先期褶皱轴发生弯曲^[2]。研究褶皱构造的叠加关系对于揭示 复杂构造变形区的构造变形过程与运动学特征具有重要意义^[13-15]。

在研究方法方面,由于构造模拟可以直观地展示叠加褶皱形态,再现叠加褶皱作用过程。20世纪50年代开始,一些研究者相继开展了相关的模拟实验,分析了叠加褶皱的构造样式、褶皱类型与形成机理等^[15~20]。其中物理模拟实验作为研究构造变形过程与形成机制

收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41172184)

作者简介:陈龙(1990-),男,硕士研究生,主要从事中、新生代构造变形研究。E-mail: chenlong201406@ sina. com 通讯作者:施炜(1971-),男,内蒙古呼和浩特人,副研究员,主要从事中、新生代构造研究。E-mail: shiweinmg@

的非常有效的方法,得到了广泛应用^[21~23]。Reynold 等^[24]最早利用橡皮泥开展了褶皱叠加 样式的物理模拟实验,验证了野外观察到的新月型与蘑菇型叠加褶皱。Driscoll^[25]利用卡片 设计了观察两期相似褶皱叠加后几何学特征的模型,并详细分析了兰姆赛经典叠加褶皱类型 中 Type1 和 Type2 的平面特征和三维立体特征。其实验的前提条件是假定地层层理非运动 面,为后期划分叠加褶皱类型提供了一定基础。Ramsay^[13,26]基于剪切叠加褶皱模型首次系 统归纳出 4 种不同类型的叠加褶皱干涉类型。物理模拟实验总结了叠加褶皱的构造样式,并 对影响叠加褶皱样式的因素进行了探索,研究结果显示叠加褶皱样式的决定因素不是晚期变 形的运动方向,而是早期褶皱的几何学特征、岩层间显著的流变性差异^[19,27~28]。这一时期, 研究者也开展了一些初步的叠加褶皱数值模拟实验,分析了 2 个或者多个方向对能干层同时 挤压作用的影响^[29]。20 世纪 80 年代,随着计算机技术的飞速发展与广泛应用,叠加褶皱的

叠加褶皱通常发育于强烈构造变形的变质岩区或韧性剪切带,因此早期的相关工作主要 集中于这些区域的叠加变形。其叠加褶皱一般为中、小、微型,可直接观察不同切面形态和 三维形态。在褶皱变形过程中常伴有与同期褶皱相关的透入性面理、线理构造,为分析叠加 褶皱类型、构造样式、叠加次序以及叠加过程提供了有利条件^[14],这些区域的叠加褶皱一 般以剪切机制形成的相似褶皱为主。因此,早期的工作着重探讨了剪切褶皱类型、干扰形式 以及叠加褶皱作用,明确了褶皱叠加作用方式主要决定于各自变形条件(晚期叠加方向、 早期褶皱剖面形态等)^[13~14,26~32]。这些研究极大地丰富了构造地质学的研究内容,叠加褶 皱的研究也逐渐成为构造地质学研究的重要内容之一,随后叠加褶皱的逐渐应用于矿产资源 调查之中^[33~36]。

实际上,沉积岩区同样普遍发育叠加褶皱,由于其叠加变形控制矿产资源分布,尤其是 油气运聚过程^[1]。因此,自20世纪90年代以来,越来越多的研究者开始关注沉积岩区叠加 褶皱的构造解析。川东北地区发育区域尺度的"双弧构造",即大巴山弧形构造与雪峰山弧 形构造,弧形构造内部可见典型的叠加褶皱^[37~38]。早期的工作主要从力学原理对叠加褶皱 进行了几何学和运动学解析^[3,11]。近年来,研究者通过大量的野外构造测量,着重同褶皱滑 动矢量观测与分析,反演了其构造应力场^[4,37,39];另外一些研究主要针对大巴山独特的弧形 构造形态与叠加构造的成因机制,开展了详细的构造数值模拟和物理模拟研究^[40-43],在此 基础上探讨了叠加构造对油气运聚控制作用^[42]。同样,雪峰山中部发育另一区域尺度的叠 加褶皱,即湘中叠加褶皱^[44],由于该叠加褶皱对探讨华南大陆中生代大地构造背景具有重 要指示意义,使得其成为近年来构造地质领域的研究热点地区^[44-45]。

1 叠加褶皱的类型及几何学特征

叠加褶皱的干涉类型及几何学特征是研究叠加褶皱的基础,然而自然界中,褶皱的叠加 变形非常复杂。

目前关于叠加褶皱的干涉类型有多种划分方式,最经典的是 Ramsay^[26]分类方案,即以 2 个角度(α,早期褶皱方向与晚期褶皱轴之夹角; β,早期褶皱轴平面之极方向与后期滑移 方向间夹角)作为判据,划分出 4 种经典的褶皱叠加方式及干扰类型(见图 1):类型 0, 无效叠加作用;类型 1,穹窿 – 盆地型;类型 2,穹窿状 – 新月形 – 磨菇状型式;类型 3, 收敛 – 离散型。此外基于纵弯褶皱机制对这些简单剪切叠加模式产生的几何复杂性,纵弯叠 加褶皱的晚期褶皱分为斜向纵弯褶皱 (Oblique flow buckling) 与垂向纵弯褶皱 (Normal flow buckling)^[14,26]。Thiessen 等^[15]认为前述 α 角作判据不理想,因此引入另外 2 个与两期褶皱 轴平面或极方向及枢纽轴有关的角度 γ 和 δ,定义了重褶类型,连续变化这 2 个参数值进行 计算,从而获取了诸多复杂的二维重褶干涉类型图象^[16]。随后的工作主要基于大量野外和 实验研究,指出早世代的褶皱受到平行枢纽的叠加缩短作用,主要形成 2 类纵弯叠加褶皱: 在第一类中,以小的晚世代褶皱叠加在大的早世代褶皱之上为特征,前者往往跨过开阔的后 者枢纽部位,形成类似于 Ramsay 分类中类型 1 的干涉样式,但早世代褶皱的轴面一般未发 生弯曲;第二类中,相对紧闭的早世代褶皱的轴面、枢纽因叠加变形发生弯曲,发育于其一 翼的晚世代背斜与另一翼向斜相连,形成类似于 Ramsay 分类中类型 2 的干涉样式。Ghosh 等^[31-32]进一步在实验研究的基础上,明确了叠加褶皱的类型主要受控于早期褶皱初始翼间 角的开合程度,并将这两类纵弯叠加褶皱归纳为 4 种(单层变形)或 5 种(多层变形)干 扰类型(见图 2)。



图 1 Ramsay 叠加褶皱的干涉类型^[14,26]





图 2 纵弯叠加褶皱 (多层变形) 干扰类型^[31~32] Fig. 2 Interference patterns of superposed buckle fold (multi-layers deformation)

类型1:早期褶皱的翼间角较大(一般大于135°),后期褶皱受控于非常舒缓的早期褶皱引起的穹盆构造,相当于经典的Ramsay干涉类型1,早期褶皱轴面一般保持面状;类型2:翼间角在90°~135°之间,波长小的晚期褶皱跨过波长大的早期褶皱轴部,早期褶皱轴 面可局部扭曲,仍属于Ramsay干涉类型1;类型3:翼间角小于90°,非圆柱状的晚期褶皱 在早期褶皱两翼向相反的方向倾伏,发育成非平面、非柱状几何形态,并伴有枢纽置换现象 发生,相当于Ramsay的干涉类型2。其主要区别表现在晚期变形过程中,早期褶皱枢纽 (F1)被一强烈弯曲的新生成的枢纽(F1')替代,伴随这一过程早期褶皱的枢纽和轴面发 生了扭曲变形,新生成的早期褶皱枢纽(F1')的弧长大于其原始枢纽弧长。早期褶皱相对 紧闭时(翼间角一般小于90°),形成此干涉类型;类型4:早期褶皱枢纽和轴面发生强烈弯 曲,具有狭窄枢纽带的早期同斜褶皱发育为非平面、非柱状几何形态,但未发生枢纽置换现 象,晚期的背斜和向斜枢纽通常向同一方向倾伏,属于Ramsay的干涉类型2,一般当早期 褶皱紧闭或同斜时形成此干涉类型;类型5:几何形态上与类型B近似,不同点是小波长的 早期褶皱枢纽带被波长大的晚期褶皱弯曲、跨过,该叠加类型常见于多层纵弯变形中。由于 这种分类方法简单明了,为随后的研究广泛采用。

杜思清等^[46]认为早期褶皱枢纽、拐线的迁移是纵弯叠加褶皱的一种机制,并据此提出 横跨型、迁移型和重褶型3种基本类型(见图3),褶皱的构造样式同样也与早期褶皱的翼 间角有关。



图 3 叠加褶皱的基本类型^[46] Fig. 3 Principal types of superposed folds

2 叠加褶皱形成的控制因素

研究表明,控制褶皱叠加作用的因素很多,主要有早期褶皱的剖面形态^[20,27-28],翼间 角、曲率与波长^[47],早期褶皱的侧向变化,早晚挤压变形应力场方向的夹角^[28,48],早期褶 皱劈理^[49],变形岩层的流变性^[51]与各项异性^[52-53]。其中早期褶皱的几何和剖面形态是决 定叠加褶皱变形机制、叠加类型及轴面方向的最主要因素,导致叠加方式的复杂性和多样 性。如果某一地区早期褶皱具有不同的剖面形态,那么不同类型的叠加褶皱将相伴共存,同时,多层纵弯叠加褶皱模式比单层变形更复杂多变。

模拟实验与野外观测表明,在纵弯叠加变形作用下,早期褶皱轴面的弯曲只能发生于早 期褶皱紧闭的情况下^[53]。然而,在相垂直的2方向同时收缩变形的情况下,变形岩层的韧 性差将取代早期褶皱的几何形态而成为决定叠加褶皱类型的主要因素。低韧性差岩层形成 Typel 类型干涉褶皱,高韧性差岩层形成 Typel 和 Type2 的混合类型。前陆盆地发育的早期 往往经历过伸展构造变形阶段,这些伸展构造不但可通过对晚期构造 3D 应力和应变场的影 响,导致不协调叠加褶皱的形成^[54],而且还能以构造反转的方式控制叠加褶皱样式^[55]。地 表作用及前陆盆地变形前沉积物厚度也可影响褶皱及其干涉类型^[48,56],如西班牙东 Iberian 地区,早期具直翼的箱状褶皱的枢纽带风化剥蚀减除再褶皱变形时的阻力,使早期褶皱的东 翼独立发生再褶皱形成轴面直立的蛇状褶皱。此外,重力在叠加褶皱形成过程中有抑止、降 低早晚世代褶皱波幅的作用,因此能促进 Type2 类型干涉褶皱的形成^[50]。

3 叠加褶皱形成机制

叠加褶皱形成机制主要有纵弯褶皱作用、横弯褶皱作用、剪切叠加褶皱等。

3.1 纵弯褶皱作用

地壳浅部,褶皱的岩层再次发生褶皱变形时多属主动变形行为,因此与主动褶皱相关的 纵弯褶皱的干涉类型更易发育和常见。而在纵弯叠加褶皱作用下,褶皱面在运动学上是主动 的,早期褶皱并不是被动褶皱的面或线,它明显控制晚期褶皱的发育,影响其几何形态及轴 向。故晚期褶皱不是一组规则的波,实现再次褶皱的关键是晚期褶皱横过早期褶皱轴的协调 相容问题,具体存在3种方式:①由于早期褶皱两翼的旋转剪切导致轴面发生断裂滑动,使 两翼独立褶皱;②早期褶皱变紧闭甚至同斜而趋于平行,使两翼一致再褶皱;③在褶皱面内 发育附加的剪切应变,形成叠加的斜向纵弯褶皱。Ramsay^[14,26]强调斜向纵弯褶皱作用是实 现纵弯叠加褶皱的一个重要途径,指出为使早期褶皱两翼不同方向的晚期褶皱以相容的方式 进行,早期褶皱两翼的晚期褶皱的差异流动方向很可能不再垂直于这些翼部任何不同方向的 晚期褶皱轴,这不同于总体位移垂直于褶皱枢纽的正向纵弯褶皱,其位移面多类似于剪切褶 皱中的位移面,因此称为斜向纵弯褶皱。这种纵弯褶皱仅在特定的条件下形成,主要为逆冲 系统相关的褶皱叠加变形导致的协调构造,据其形态、产出部位等差异,不同研究者分别称 之为接合褶皱、角褶皱等^[57-59]。这些构造往往局部产出,其控制因素仍存争议。

此外,早期褶皱的枢纽置换是纵弯叠加褶皱的另一重要形成机制。当中等紧闭的非同斜 褶皱在与轴向大角度相交的挤压应力场中再次纵弯褶皱时,由于早期褶皱两翼方向不同的晚 期褶皱,导致原始枢纽(F1)所在质点线失去枢纽属性,并发生扭曲变形,而被一新生成 的强烈弯曲的枢纽(F1')替代,即早期褶皱发生了枢纽置换作用,在早期褶皱两侧形成一 系列对应新生成的枢纽(F1')的晚期褶皱^[31~32]。新生褶皱枢纽(F1')在褶皱展平后仍为 曲线,其原始迹线不能恢复。在引起褶皱变形的两期挤压应力方向交角较低(小于 60°) 时,早期褶皱会发生旋转、变位,并直接转变成晚期褶皱,而不形成真正意义上的叠加褶 皱,类似于 Ramsay 类型 0 无效叠加褶皱现象。此过程中往往伴随早期褶皱枢纽迁移作用, 即原枢纽位置发生了主动、连续的旋转、变化而位于褶皱面的不同质点线上。枢纽迁移是非 常普遍的纵弯褶皱变形机制^[3,46],不仅在多世代褶皱相关叠加变形时存在,在同一期褶皱的 生长过程中也会发生。褶皱层的能干性对枢纽迁移强度有明显影响,一般情况下,二者成正 相关,枢纽迁移量决定于纵弯缩短及层面应变的速率^[49]。

进一步研究表明,枢纽置换与枢纽迁移两种褶皱变形机制多伴随着早期褶皱翼间角的变化^[60],虽然人们很早就认识到叠加褶皱变形过程中存在早期褶皱变开阔与紧闭,但关于这几种变形机制的相互联系与作用方式,目前缺乏具体研究。

3.2 横弯褶皱作用

岩层受到与岩层面垂直的外力作用而发生弯曲形成褶皱的过程称为横弯褶皱作用。地壳物质的垂直升降运动是产生这种作用的基本条件,如岩浆的上升顶托,以及岩盐、石膏或黏 土等低黏度、低密度易流动物质的上拱刺穿上覆岩层,基底的断块升降等,均是导致横弯褶 皱作用的重要因素,因此也称为底辟褶皱作用^[61]。

底辟构造一般包括3部分:①高塑性物质组成的底辟核,核内物质往往呈现复杂的塑性 变形;②核上构造(上覆岩层)往往是外形不规则的穹隆或短轴背斜,其内部构造特征如 上述横弯褶皱的基本特征;③核下构造一般比较简单。

当底辟核为岩盐时,称为岩丘构造。典型的盐丘直径2~3 km,边部陡倾,可以向下延伸达几千米。内部构造通常十分复杂,大量发育紧闭陡倾伏褶皱、重褶皱和多次重褶皱现象,如美国 Utah 州中部出露的典型底辟叠加褶皱^[62]。许多学者研究认为盐丘的形成是由于盐层与其上覆密度较大的围岩间密度的差异所致^[63~64]。如果底辟核是侵入岩,岩浆上升侵入围岩,并使上覆岩层上拱形成穹隆,这种作用过程也称岩浆底辟作用。岩浆底辟作用是一种重要的地质作用,它不仅导致广泛的沉积岩层发育地区出现以岩浆岩为底辟核的穹隆形成,太古宙高级变质岩区发育的典型构造样式"卵形构造"或称"片麻岩穹隆",也多认为与岩浆底辟作用有关^[65]。

3.3 剪切叠加褶皱

剪切褶皱作用又称滑褶皱作用,是岩层沿着一系列与层面不平行的密集劈理发生差异滑 动形成的褶皱,属于典型的相似褶皱。原始层面在这种褶皱作用中已不起控制作用,只是反 映滑动结果的标志^[61]。剪切叠加褶皱与主动 – 纵弯叠加褶皱存在很大差别^[27,29,66~67],其形 成机制一直存在争议^[13]。剪切叠加褶皱是被动褶皱作用形成的,其褶皱面在运动学上是完 全被动的,褶皱面的质点和质点线的位移与横过层面的滑动、流动或剪切有关,而与褶皱本 身的空间位态无关,因此相关的叠加褶皱系统可比拟为2组独立波的干扰型式,其形成的褶 皱叠加类型仅受控于叠加的收缩或伸展应力场的大小及其相对早世代褶皱的方向,与早世代 褶皱的剖面形态无关^[14,26]。一些研究者认为大多数剪切褶皱是在强烈变形条件下,在先期 褶皱的基础上再发生的,不是单纯的与层面斜交的剪切作用的产物,而是纵弯和剪切2种机 制联合作用的产物^[68]。解决剪切褶皱形成机制的关键在于滑动面的成因,学者们对轴面劈 理的成因进行了许多研究^[69],指出其作为一个物质面,初始和最终的发育均垂直于应变椭 球体的最小应变方向,并认为其具有挤压和剪切的双重力学性质^[68]。

目前叠加褶皱的研究一般集中在单一褶皱形成机制,而自然界的褶皱实际上并非形成于 单一机制,褶皱的几何形态往往是其相关构造、位置、时间等变化的综合反映,显示了大陆 地壳变形在时间和空间上的非均一性,是几种机制联合作用的结果,具有复杂的变形应力 场^[50]。在同一构造事件的递进变形过程中,因挤压方向的连续变化或多个方向同时作用的 收缩变形也能导致叠加褶皱或类似叠加褶皱作用的发生^[19,70-71],其产生的叠加褶皱比两期 构造事件引起的叠加褶皱的几何形态往往更无序,难以区分。研究表明,前陆挤压变形带中 断裂相关褶皱的叠加褶皱类型及形成机制基本能用纵弯褶皱机制得到解释^[74];而断裂相关的膝折褶皱的叠加干涉与纵弯褶皱的干涉机制不同,褶皱叠加的型式主要受逆冲断层控制。由于断裂切割深度、时空活动变化更能引起一些特殊的叠加褶皱干涉型式^[73-74],因此探讨叠加褶皱的形成机制时,需要根据实际情况,在详细的构造解析工作基础上,才可能做出合理的解释。

4 实例分析

结合上述叠加褶皱的研究进展,本文选取了国内外相关的典型实例,总结其叠加褶皱类型、构造样式与形成机理。

4.1 大巴山前陆叠加褶皱

大巴山前陆位于中扬子板块西北缘,通过城口—房县断裂带与大巴山逆冲推覆带相接, 共同构成大巴山造山带^[75]。总体上,大巴山前陆表现为一系列北北西—北西—东西走向紧 密排列的向南西突出的弧形褶皱和断裂组成的缩短带^[39]。大巴山前陆叠加褶皱以大巴山前 陆西段最为典型,乐光禹等^[3]分析了区域内多组系褶皱断裂带的递进扩展和叠加干扰过程, 指出米仓山背斜和南侧向斜以较大波长的大型宽缓褶皱为特征,而大巴山构造前陆是由较小 波长的紧闭褶皱组成,其中高级别的褶皱可从包络面或中面的露头形态确定。叠加褶皱成因 机制是,近南北向大巴山构造带的前缘带叠加在东西向米仓山复式背斜之上,形成复杂的横 跨叠加褶皱类型^[39,76],相当于 Ghosh^[29]的1 类叠加褶皱。总体上表现为近东西向与近南北 向2组褶皱叠加形成的横跨叠加褶皱^[9,38~39,42,75](见图 4),同褶皱变形分析表明其分别受 近东西向与近南北向构造挤压作用控制^[9](见图 4)。大比例尺构造填图与构造观测表明, 大巴山前陆中段的构造样式同样以横跨叠加褶皱为特征^[10],而大巴山前陆东段则表现为共 轴叠加褶皱、斜跨叠加褶皱和联合构造3种构造样式的叠加褶皱,叠加褶皱源于近东西向、 北西向和北东向3组不同方位的褶皱构造相互叠加^[39,42]。

构造模拟与详细的构造测量表明,大巴山前陆叠加褶皱源于向南西突出的弧形褶皱带叠加于近东西向褶皱构造之上形成^[9],弧形构造向南西扩展,大巴山西段前缘受到较早生成的东西向米仓山复背斜限制,以不同级别的强烈褶皱叠加在宽缓的米仓山复式背斜带之上,两者轴向正交,形成横跨叠加褶皱^[3],局部位置可见典型的露头尺度穹窿构造^[38]。总体上,大巴山前陆晚期的弧形褶皱带卷入的最新地层为中侏罗统,结合大巴山逆冲推覆体构造年代学研究^[10,77],大巴山叠加褶皱形成于中侏罗世晚期—早白垩世早期。其形成机制可归结为造山带前陆扩展模式^[79],即南秦岭造山带整体沿城口—房县断裂带向南西逆冲推覆过程中,受汉南—米仓山地块和神农架—黄陵地块的阻挡,导致大巴山构造带由北东向南西的显著缩短,叠加在早期近东西向构造带之上,在其前陆形成多种样式的叠加褶皱^[9,42]。

4.2 伊比利亚山东部叠加褶皱

伊比利亚山东部叠加褶皱出露于西班牙东部的阿里亚加地区第三纪地层中(见图5)。 在地质填图与遥感影像解译基础上,结合野外褶皱相关叠加构造测量表明,该区主要发育东 北东向褶皱和北北西—南南东向褶皱,叠加褶皱样式主要有2大类型、5种模型。Typela为 T型叠加褶皱,晚期褶皱与早期不同走向的褶皱末端位置相连接,典型例子主要出露在Los Olmos 附近(见图5)。Typelb为"接触型"叠加褶皱,晚期褶皱形成于早期褶皱其中一翼 上,并与其枢纽相连。这类叠加褶皱多发现于早期北北西—南南东向褶皱西翼,典型的有



图 4 大巴山前陆西段叠加褶皱及其构造应力场特征^[38] Fig. 4 Superposed folds and tectonic stress fields in the western segment of Dabashan Foreland Belt

La Lastra 向斜、Campos 背斜、Camarillas 背斜等; Type1c 为 L 型叠加褶皱,在形成时间序列 上存在不确定性,但在几何模型上还是属于不同机制下的产物。Skjernaa 认为这种叠加类型 不属于单一褶皱形成的"月亮型"^[18]。L 型叠加褶皱仅在阿里亚加地区东北角的第三纪地层 可见; Type1d 为"蛇形"叠加褶皱,早期直立褶皱遭受平行于枢纽的构造挤压作用,导致 其中一翼的地层发生不协调变形;阿里亚加地区出露的 Type2 基本是 Type2a,与 Ghosh^[31]第 三种模型基本一致,典型的例子出露在古近系盆地的东北缘,由于晚期东北东—西南西向褶 皱的叠加使早期北西—南东背斜的波长大幅度变化。详细的构造测量,结合地层接触关系与 卷入变形的地层特征分析表明,伊比利亚山东部主要受 2 期构造挤压作用控制。早期东北东



图 5 研究区区域地质图^[48] Fig. 5 Geological sketch of the Mt. Ibérian

一西南西向构造挤压作用导致区内北北西—南南东向褶皱和逆冲断层形成,由于北北西—南 南东向褶皱影响了完整的古近纪地层,确定 Campos 背斜的东翼形成于中始新世,西翼形成 于渐新世—中新世^[48]。中始新世—晚渐新世时期北北东—北东向构造挤压作用导致东北东 向褶皱并叠加于早期的北北西—南南东向褶皱,形成叠加褶皱^[48]。动力学机制方面,早期 北北西—南南东向褶皱和晚期东北东—西南西向褶皱的形成分别可能与阿尔卑斯陆内造山北 东向挤压和南东—南南东向挤压有关,即中始新世—晚渐新世的北北东—北东向构造挤压作 用导致区域性褶皱与断层构造发育,早中新世则主要受南东—南南东向构造挤压作用,导致 欧洲和非洲之间的造山带从比利牛斯山移动到伊比利亚边缘的贝蒂克山。

5 存在问题与展望

地壳浅层次岩层中的褶皱多为大中型尺度,野外露头尺度叠加褶皱非常有限,而且往往缺乏各种伴生的透入性构造,使得叠加褶皱的构造样式研究存在一定困难。地层叠加变形过程中,往往没有相关的同变形矿物生成,使得叠加变形绝对时限难以确定。在强烈变形区, 地层变形更为复杂,由于变形岩石性质及边界条件的差异等,往往会出现递进变形导致的褶皱轴面连续变形及褶皱轴线发生弯曲等现象,但这并不一定指示褶皱叠加作用。这些问题导致叠加褶皱的研究存在很大难度。目前多数研究仍然以定性或者半定量为主,但叠加褶皱的数字化、定量化与可视化是其发展趋势。此外,叠加褶皱系统内的许多力学问题也一直是相关研究的难点,Ramsay^[14]曾指出:"还没有人在任何精确的理论基础上研究过这样复杂连接的多层系统岩层可能形成的失稳。"

如何更有效地解析叠加褶皱,是构造地质学领域需要不断探索的任务之一。叠加褶皱的 几何学分析是其研究基础,除通过详细的大比例尺构造填图与野外调查之外,需要结合地球 物理数据所提供的深部结构,从小、中、大尺度等多个层次进行分析。叠加褶皱的运动学是 褶皱构造研究中的难点和重点,目前多运用数值模拟与物理模拟研究。在数值模拟研究中由 于有限元方法自身在大变形模拟方面的不足,使得其在探讨叠加褶皱的形成机制方面显得非常有限。目前随着基于离散元的大变形数值模拟软件不断进步,叠加褶皱的构造模拟正逐渐成熟。实际上,叠加褶皱的构造模拟研究,需要同时结合野外调查,才能获得其可靠运动学特征。近年来一些研究者为获得叠加变形运动学的直接证据,开展了同褶皱变形构造测量工作,尝试通过测量同褶皱变形所伴生的滑动矢量,恢复褶皱变形的构造应力场,进而提出研究区的构造演化^[5,39~60,42]。

总之,叠加褶皱研究需要在大比例尺构造填图与详细的野外构造观测基础上,通过精细 构造解析和变形序列分析,结合深部地质构造分析,才能查明其三维几何形态、构造样式与 运动学特征。并结合构造年代学与构造模拟研究,定量化地再现其形成序列与发育机制。

参考文献

[1] 李四光. 地质力学概论 [M]. 北京:科学出版社, 1973: 1~228.

LI Si-guang. Introduction to Geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1973: 1~228.

- [2] 乐光禹,杜思清.应力叠加和联合构造 [J].中国科学 B 辑, 1986, (8): 867~877.
 YUE Guang-yu, DU Si-qing. Stress superposition and joint structure [J]. Science in China (Series B), 1986, 8: 867~877.
- [3] 乐光禹,杜思清,黄继钧,等.构造复合联合原理——川黔构造组合叠加分析 [M].成都:成都科技大学出版 社,1996:1~281.

YUE Guang-yu, DU Si-qing, HUANG Ji-jun, et al. The theory of structure superposition-tectonic combination superposition analysis in Sichuan and Chongqing [M]. Cehngdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996: 1 ~281.

- [4] SHI Wei, DONG Shuwen, LI Jianhua, et al. Formation of the Moping dome in the Xuefengshan orocline, central China and its tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2013, 87 (3): 720 ~729.
- [5] SHI Wei, DONG Shuwen, Ratschbacher L, et al. Meso-Cenozoic tectonic evolution of the Dangyang Basin, north-central Yangtze Craton, central China [J]. International Geology Review, 2013, 55 (3): 382 ~ 396.
- [6] 汤加富,王希明,刘芳宇,等.武功山变质岩区构造变形与地质填图 [M].武汉:中国地质大学出版社,1991: 1~133.

TANG Jia-fu, WANG Xi-ming, LIU Fang-yu, et al. Tectonic deformation and geological mapping in Wugongshan Mountain metaporphic rock area [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 1 ~ 133.

- [7] Li Sanzhong, Kusky T M, Zhao Guochun, et al. Two-stage Triassic exhumation of HP-UHP terranes in the western Dabie orogen of China: Constraints from structural geology [J]. Tectonophysics, 2010, 490 (3): 267 ~ 293.
- [8] 傅昭仁,蔡学林. 变质岩构造地质学 [M]. 北京:地质出版社, 1996: 1~243.
 FU Zhao-ren, CAI Xue-lin. Metamorphic rock structural geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1~243.
- [9] Shi Wei, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al. Intra-continental Dabashan orocline, southwestern Qinling, central China
 [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 46: 20 ~ 38.
- [10] Hu Jianmin, Chen Hong, Qu Hongjie, et al. Mesozoic deformations of the Dabashan in the southern Qinling orogen, central China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47: 171 ~ 184.
- [11] 黄继均. 纵弯褶皱叠加地区应力场研究——以川东地区为例 [J]. 地质科学, 2000, 35 (2): 140~150.
 HUANG Ji-jun. The features of finite strain of rocks in the superposition fold area under bucking in Northeast Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Geology, 2000, 35 (2): 140~150.
- [12] 杜思清. 纵弯褶皱叠加的移褶现象和移褶叠加褶皱 [J]. 地质论评, 1986, 32 (4): 359~366.
 DU Si-qing. The fold shift phenomenon and shift folds produced by superposition of flexural folds [J]. Geological Review, 1986, 32 (4): 359~366.
- [13] Ramsay J G. Interference patterns produced by the superposition of folds of similar type [J]. The Journal of Geology, 1962, 71: 466~481.

- [14] Ramsay J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology, Vol. 2: Folds and fractures [M]. London: Academic Press, 1987: 475 ~ 501.
- [15] Thiessen R L, Means W D. Classification of fold interference patterns: A reexamination [J]. Journal of Structural Geology, 1980, 2 (3): 311 ~ 316.
- [16] Thiessen R L. Two-dimensional refold interference patterns [J]. Journal of Structural Geology, 1986, 8 (5): 563 ~ 573.
- [17] Ghosh S K. Experimental tests of buckling folds in relation to strain ellipsoid in simple shear deformations [J]. Tectonophysics, 1966, 3 (3): 169~185.
- [18] Skjernaa L. Experiments on superimposed buckle folding [J]. Tectonophysics, 1975, 27 (3): 255 ~ 270.
- [19] Johns M K, Mosher S. Physical models of regional fold superposition: The role of competence contrast [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 18 (4): 475 ~ 492.
- [20] Grujic D, Walter T R, G? rtner H. Shape and structure of (analogue models of) refolded layers [J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24 (8): 1313 ~ 1326.
- [21] Dooley T, McClay K. Analog modeling of pull-apart basins [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (11): 1804 ~1826.
- [22] Chemenda A, Deverchere J, Calais E. Three-dimensional laboratory modeling of rifting: Application to the Baikal Rift, Russia [J]. Tectonophysics, 2002, 356 (4): 253 ~ 273.
- [23] 周建勋,周建生. 渤海湾盆地新生代构造变形机制:物理模拟和讨论 [J]. 中国科学: D 辑, 2006, 36 (6): 507~519.

- [24] Reynolds D L, Holmes A. The superposition of Caledonoid folds on an older fold-system in the Dalradians of Malin Head,
 Co. Donegal [J]. Geological Magazine, 1954, 91 (6): 417 ~ 444.
- [25] O'Driscoll E S. Interference patterns from inclined shear fold systems [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1964, 12 (2): 279 ~ 310.
- [26] Ramsay J G. Folding and fracturing of rocks [M]. NewYork: Mr. Graw Hill, 1967: 1 ~ 560.
- [27] Watkinson A J. Patterns of fold interference: influence of early fold shapes [J]. Journal of Structural Geology, 1981, 3 (1): 19~23.
- [28] Odonne F, Vialon P. Hinge migration as a mechanism of superimposed folding [J]. Journal of Structural Geology, 1987, 9 (7): 835 ~ 844.
- [29] Ghosh S K, Ramberg H. Buckling experiments on intersecting fold patterns [J]. Tectonophysics, 1968, 5 (2): 89 ~ 105.
- [30] Tobisch O T. Large-scale basin-and-dome pattern resulting from the interference of major folds [J]. Geological Society of America Bulletin, 1966, 77 (4): 393 ~ 408.
- [31] Ghosh S K, Mandal N, Khan D, et al. Modes of superposed buckling in single layers controlled by initial tightness of early folds [J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14 (4): 381 ~ 394.
- [32] Ghosh S K, Mandal N, Sengupta S, et al. Superposed buckling in multilayers [J]. Journal of Structural Geology, 1993, 15 (1): 95~111.
- [33] 戴元裕. 江西省新余太平山铁矿区叠加褶皱构造解析并论恢复复杂褶皱系的包络面的意义 [J]. 地质找矿论丛, 1986, 1 (2): 13~22.

DAI Yuan-yu. A structural analysis of superimposed folds at Taipingshan iron mine, Xinyu County, Jiangxi Province, and the significance of reconstructing envelopes in the complicated fold system [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1986, 1 (2): 13 ~ 22.

- [34] 胡健民. 东秦岭地区秦岭群中片麻岩穹窿成因分析 [J]. 长安大学学报:地球科学版, 1989, (2): 20~28.
 HU Jian-min. The genesis of the gneiss domes in the Qinling group in the eastern Qinling mountains [J]. Journal of Chang' an University: Natural Science Edition, 1989, (2): 20~28.
- [35] 王桂梁. 论中国煤矿中的叠加褶皱 [J]. 地学前缘, 1999, 6 (增刊): 175~182.
 WANG Gui-liang. Discussion on superimposed folds in coalmines of China [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 6 (Supp.): 175~182.
- [36] 胡明,秦启荣,李昌全. 叠加构造分析及其应用 [J]. 地质与勘探, 2005, 25 (12): 25~27.

ZHOU Jian-xun, ZHOU Jian-sheng. The Cenozoic tectonic deformation mechanism of Bohai Bay Basin: Physical simulation and discussion [J]. Science in China: Series D, 2006, 36 (6): 507 ~ 519.

HU Ming, QIN Qi-rong, LI Chuang-quan. Research on the hydrocarbon generation history of the source rocks in upper Triassic series and Jurassic series in west Sichuan depression [J]. Geology and Propecting, 2005, 25 (12): 25 ~ 27.

- [37] 董树文,胡健民,施炜,等.大巴山侏罗纪叠加褶皱与侏罗纪前陆 [J].地球学报,2006,27 (5):403~410.
 DONG Shu-wen, HU Jian-min, SHI Wei, ZHANG Zhong-yi, LIU Gang. Jurassic superposed folding and Jurassic foreland in the Daba mountain, Central China [J]. ACTA GEOSCIENTICA SINICA, 2006, 27 (5):403~410.
- [38] 施炜,董树文,胡健民,等.大巴山前陆西端叠加构造变形分析及其构造应力场特征 [J].地质学报,2007,81 (10):1314~1327.

SHI Wei, DONG Shu-wen, HU Jian-min, et al. An analysis of superposed deformation and tectonic stress fields of the western segment of Daba Mountains Foreland [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (10): 1314 ~ 1327.

- [39] Shi Wei, Dong Shuwen, Ratschbacher L, et al. Meso-Cenozoic tectonic evolution of the Dangyang Basin, north-central Yangtze craton, central China [J]. International Geology Review, 2013, 55 (3): 382 ~396.
- [40] 武红岭,施炜,董树文,等.大巴山前陆叠加构造力学特征的模拟研究 [J]. 地学前缘, 2009, 16 (3): 190 ~196.

WU HongVling, SHI Wei, DONG Shu-wen, et al. A numerical simulating study mechanical characteristic of superposed deformation in Daba Mountain foreland [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (3): 190 ~ 196.

[41] 张岳桥,施炜,李建华,等.大巴山前陆弧形构造带形成机理分析 [J].地质学报,2010,84 (9):1300 ~1315.

ZHANG Yue-qiao, SHI Wei, LI Jian-hua, et al. Formation mechanism of the Dabashan foreland arc-shaped structural belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84 (9): 1300 ~ 1315.

- [42] Shi Wei, Wu Hongling, Dong Shuwen, et al. Oil/gas migration and aggregation in intra-continental orogen based on numerical simulation: A case study from the Dabashan orocline, Central China [J]. Journal of Earth Science, 2013, 24: 254 ~ 261.
- [43] 王瑞瑞,许志琴,梁风华.大巴山弧形构造的成因——来自数值模拟的证据 [J].地质学报,2013,87 (10): 1489~1497.

WANG Rui-rui, XU Zhi-qin, LIANG Feng-hua. Origin of the Dabashan salient: Evidence from mumerical modeling [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87 (10): 1489 ~ 1497.

[44] 张岳桥,徐先兵,贾东,等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录 [J]. 地学前缘, 2009, 16 (1): 234~247.

ZHANG Yue-qiao, XU Xian-bing, JIA Dong, et al. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the early Mesozoic [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16 (1): 234 ~ 247.

[45] 王建,李三忠,金宠,等. 湘中地区穹盆构造:褶皱叠加期次和成因 [J]. 大地构造与成矿学,2010,34 (2): 159~165.

WANG Jian, LI San-zhong, JIN Chong, et al. Dome and basin pattern in central Hunan Province: Stages and genesis of fold superposition [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34 (2): 159 ~165.

- [46] 杜思清,刘援朝. 纵弯褶皱叠加机制和类型的研究现状 [J]. 矿物岩石, 1998, 18 (3): 73~81.
 DU Si-qing, LIU Yuan-chao. Superposition of bucking folds mechanism and types of research situation [J]. Journal of
- Minerlogy and Petrology, 1998, 18 (3): 73 ~ 81.
 [47] Forbes C J, Betts P G. Development of type 2 fold interference patterns in the Broken Hill Block: implications for strain
- [47] Follows G.J., Bets F.G. Betelepinent of type 2 ford interfetched patents in the Bioken Thir Bioke, implications for small partitioning across a detachment during the Olarian Orogeny [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2004, 51 (2): 173 ~188.
- [48] Simón J L. Superposed buckle folding in the eastern Iberian Chain, Spain [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26 (8): 1447 ~ 1464.
- [49] Ghosh S K, Deb S K, Sengupta S. Hinge migration and hinge replacement [J]. Tectonophysics, 1996, 263 (1): 319 ~ 337.
- [50] Johns M K, Mosher S. Physical models of regional fold superposition: The role of competence contrast [J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18 (4): 475 ~ 492.

- [51] Faure M, Lin W, Sun Y. Doming in the southern foreland of the Dabieshan (Yangtse block, China) [J]. Terra Nova, 1998, 10 (6): 307 ~ 311.
- [52] Froitzheim N. Formation of recumbent folds during synorogenic crustal extension (Austroalpine nappes, Switzerland) [J].
 Geology, 1992, 20 (10): 923 ~ 926.
- [53] Ghosh S K, Khan D, Sengupta S. Interfering folds in constrictional deformation [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17 (10): 1361 ~ 1373.
- [54] Beauchamp W. Superposed folding resulting from inversion of a synrift accommodation zone, Atlas Mountains, Morocco [C] // AAPG Memoir 82. Tulsa: AAPG, 2004: 635 ~ 646.
- [55] Carrera N, Mu? oz J A, Sùbat F, et al. The role of inversion tectonics in the structure of the Cordillera Oriental (NW Argentinean Andes) [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28 (11): 1921 ~ 1932.
- [56] Mon R, Monaldi C R, Salfity J A. Curved structures and interference fold patterns associated with lateral ramps in the Eastern Cordillera, Central Andes of Argentina [J]. Tectonophysics, 2005, 399 (1): 173 ~ 179.
- [57] Stauffer M R. Fold interference structures and coaptation folds [J]. Tectonophysics, 1988, 149 (3): 339 ~ 343.
- [58] Lisle R J, Martnez J L F. Structural analysis of seismically mapped horizons using the developable surface model [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89 (7): 839 ~ 848.
- [58] Stewart S A. Fold interference structures in thrust systems [J]. Tectonophysics, 1993, 225 (4): 449~456.
- [60] Sengupta S, Ghosh S K, Deb S K, et al. Opening and closing of folds in superposed deformations [J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27 (7): 1282 ~ 1299.
- [61] 徐开礼,朱志澄.构造地质学 [M].北京:地质出版社,1987:62~96.
 XU Kai-li, ZHU Zhi-cheng. Structural Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:62~96.
- [62] Witkind I J. Salt diapirism in central Utah [C] // Nielson D L. Overthrust belt of Utah. Utah Geological Association, 1982: 13 ~ 30.
- [63] Barton D C. Mechanics of formation of salt domes with special reference to Gulf Coast salt domes of Texas and Louisiana
 [J]. AAPG Bulletin, 1933, 17 (9): 1025 ~ 1083.
- [64] Nettleton L L. Fluid mechanics of salt domes [J]. AAPG Bulletin, 1934, 18 (9): 1175 ~ 1204.
- [65] 傅昭仁,单文琅,葛梦春.变质岩层构造的形变相分析 [J].地球科学:中国地质大学学报,1983,(3):63 ~74.

FU Zhao-ren, SHAN Wen-lang, GE Meng-chun. Metamorphic strata structure analysis of the deformation phase [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 1983, (3): 63 ~74.

- [66] Turner F J, Weiss L E. Structural analysis of metamorphic tectonites [J]. Literary Licensing, 1963: 1 ~ 554.
- [67] Abbassi M R, Mancktelow N S. The effect of initial perturbation shape and symmetry on fold development [J]. Journal of Structural Geology, 1990, 12 (2): 273 ~ 282.
- [68] 董成斌. 湖北省郧县红岩背地区剪切褶皱构造解析 [J]. 成都理工学院学报, 1996, 23: 88~96. DONG Cheng-bin. The structural analysis of the shear fold in HongYanBei area, Yun Country, Hubei Province [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1996, 23: 88~96.
- [69] Murphy F X. The role of pressure solution and intermicrolithon-slip in the development of disjunctive cleavage domains: A study from Helvick Head in the Irish Variscides [J]. Journal of structural geology, 1990, 12 (1): 69 ~81.
- [70] De Beer C H. Fold interference from simultaneous shortening in different directions: The Cape Fold Belt syntaxis [J]. Journal of African Earth Sciences, 1995, 21 (1): 157 ~ 169.
- [71] Evenchick C A. Northeast-trending folds in the western Skeena Fold Belt, northern Canadian Cordillera: A record of Early Cretaceous sinistral plate convergence [J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23 (6): 1123 ~ 1140.
- [72] Aller J, Gallastegui J. Analysis of kilometric-scale superposed folding in the Central Coal Basin (Cantabrian zone, NW Spain) [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17 (7): 961 ~969.
- [73] McClay K R, Whitehouse P S, Dooley T, et al. 3D evolution of fold and thrust belts formed by oblique convergence [J].
 Marine and Petroleum Geology, 2004, 21 (7): 857 ~ 877.
- [74] Savage H M, Cooke M L. The effect of non-parallel thrust fault interaction on fold patterns [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26 (5): 905 ~ 917.

- [75] 张国伟,张本仁,袁学诚,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001:1~855.
 ZHANG Guo-wei, ZHANG Ben-ren, YUAN Xue-cheng, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M].
 Beijing: Science Press, 2001:1~855.
- [76] 张忠义,董树文,张岳桥,等.大巴山前陆北西向褶皱的厘定及其意义 [J].地质论评,2009,55 (1):10 ~23.

ZHANG Zhong-yi, DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, et al. NW folding distinguished in the northwestern Daba Mountains, central China, it's tectonic significances [J]. Geological Review, 2009, 55 (1): 10~23.

- [77] Shi W, Zhang Y, Dong S, et al. Intra-continental Dabashan orocline, southwestern Qinling, central China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 46: 20 ~ 38.
- [78] Yang Z, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Late-stage foreland growth of China's largest orogens (Qiling, Tibet): Evidence form the Hannan-Micang crystalline massifs and the northern Sichuan Basin, central China [J]. Lithosphere, 2013, 5 (4): 420.
- [79] 蔡学林,魏显贵,吴德超,等. 武当山推覆构造结构模式 [J]. 成都地质学院学报,1988,15 (4):30~39.
 CAI Xue-lin, WEI Xian-gui, WU De-chao, et al. Nappe structure patterns in the Wudang Mountains [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1998, 15 (4):30~39.

SUPERPOSED FOLD: AN OVERVIEW

CHEN Long^{1,2}, SHI Wei²

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Superposed fold, representing one of the most significant structures, is predominately derived from multistage crustal shortening, documenting a multiphase tectonic evolution history in a certain region. In order to deepen the understanding of the superposed fold, this paper gives an overview of the previous studies for superposed fold, and mainly focused on the structural style and formation mechanism. Here we suggest a superposed fold is dominantly originated from buckling folding, bending folding or shear folding, as reveled by an amount of field observation, physical and numerical simulation; then we give two case studies on the superposed fold. Additionally this paper summarizes a number of issues and probable methods on superposed fold analyzing.

Key words: superposed fold; structural style; tectonic stress fields; formation mechanism; numerical simulation