https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.228



双滑脱层强度对博格达山北缘构造变形的影响:基于 离散元数值模拟

屈梦雪^{1,2},程晓敢^{1,2*},田禾丰^{1,2},陈汉林^{1,2},于洪洲³,陈昌锦^{1,2},孙思瑶^{1,2}

1. 浙江大学地球科学学院,浙江杭州 310027

2. 教育部含油气盆地构造研究中心,浙江杭州 310027

3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257015

摘 要:博格达山北缘褶皱冲断带以横向分段、纵向分层、多期构造变形叠加、先存构造发育为主要特征,发育有中侏罗统西 山窑组和下侏罗统八道湾组两套滑脱层,为探究这两套滑脱层内聚力强度差异及先存构造对冲断带新生代构造变形的影响, 研究采用离散元数值模拟方法,在布设先存构造的基础上设计了无滑脱层模型和不同内聚力强度组合的双滑脱层模型共5组 数值模拟实验.实验结果表明:双滑脱层内聚力强度相同时,上滑脱层在应力传播中占据优势;双滑脱层内聚力强度不同时,应 力会优先沿弱内聚力滑脱层传递,且当下滑脱层内聚力较弱时,上滑脱层可能不发挥作用.通过对比实验结果与实际地质剖 面,认为先存构造控制了冲断带构造变形的总体样式,而两套滑脱层共同控制了冲断带纵向上的变形解耦,上部滑脱层内聚力 弱于下部滑脱层是影响研究区新生代构造变形的关键性因素.

关键词:博格达山北缘;褶皱冲断带;离散元数值模拟;双滑脱层;内聚力强度;先存构造;构造地质学.
中图分类号: P542
文章编号: 1000-2383(2023)04-1366-13
收稿日期:2022-04-08

Effect of Double-Décollement Strength on Structure Deformation in Northern Bogda Mountain Using Discrete Element Numerical Simulation

Qu Mengxue^{1,2}, Cheng Xiaogan^{1,2*}, Tian Hefeng^{1,2}, Chen Hanlin^{1,2}, Yu Hongzhou³, Chen Changjin^{1,2}, Sun Siyao^{1,2}

1. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Structure Research Center of Oil & Gas Bearing Basin of Ministry of Education, Hangzhou 310027, China

3. Shengli Oil Field Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Dongying 257015, China

Abstract: The fold-thrust belt of the northern Bogda Mountain is characterized by horizontal segmentation, vertical stratification, overlap of multi-phase structure deformation and rich pre-existing structures. Two décollements, the Xishangyao Formation of Upper Jurassic and the Badaowan Formation of Lower Jurassic, are developed in this area. In order to investigate the influence of the difference in cohesion strength between the two décollements and the pre-existing structures on the structure deformation in Cenozoic, this study designed five experiments including a model without décollement and four double-décollement models with

基金项目:国家重点研发计划(No. 2019YFC0605501);国家自然科学基金(No.41720104003).

作者简介:屈梦雪(1998-),女,硕士研究生,主要从事褶皱冲断带构造研究.ORCID:0000-0002-0475-4059. E-mail: 22038017@zju.edu.cn * 通讯作者:程晓敢,ORCID:0000-0002-0295-2158. E-mail: chengxg@zju.edu.cn

引用格式:屈梦雪,程晓敢,田禾丰,陈汉林,于洪洲,陈昌锦,孙思瑶,2023.双滑脱层强度对博格达山北缘构造变形的影响:基于离散元数值模 拟.地球科学,48(4):1366-1378.

Citation: Qu Mengxue, Cheng Xiaogan, Tian Hefeng, Chen Hanlin, Yu Hongzhou, Chen Changjin, Sun Siyao, 2023. Effect of Double-Décollement Strength on Structure Deformation in Northern Bogda Mountain Using Discrete Element Numerical Simulation. *Earth Science*, 48(4): 1366-1378.

different cohesion strength combinations adopted the discrete element method, on the basis of laying out pre-existing structures. The experimental results show that when the cohesion strengths of the double-décollement are the same, the upper décollement has the advantage in stress propagation; when the cohesion strengths of the double-décollement are different, the stress will preferentially transmits along the weaker cohesion décollement, and when the cohesion strength of the lower décollement is weaker, the upper décollement may not play a role. By comparing the experimental results with actual geological profile, it is concluded that the pre-existing structures control the structure deformation style of the thrust belt. However, the two décollements jointly control the tectonic decoupling in the vertical of the fold-thrust belt, and that the cohesion strength of the upper décollement

weaker than that of the lower décollement, which is a key factor affecting the Cenozoic structure deformation in the study area. **Key words:** northern Bogda Mountain; fold-thrust belt; discrete element method; double-décollement; cohesion strength; preexisting structure; structural geology.

博格达山位于新疆北部,整体呈东西向展布, 将南部的吐哈盆地和北部的准噶尔盆地分隔开来, 在区域沉积物源供给和构造演化中占据重要位置 (王国灿等,2020)(图1a).博格达山北缘冲断带也 是整个东北天山褶皱冲断带的前锋(Zhou et al., 2020),在新生代印亚碰撞的远程效应影响下变形 强烈(Tapponnier and Molnar,1979;Avouac et al., 1993;Yin et al., 1998),是研究东北天山新生代变 形扩展的有利区域.博格达山北缘先后发现了甘 河、三台等油气田以及古牧地背斜等多个含油气构 造(康竹林,1997),是有利的油气勘探区域(文志刚 等,2005;邹会明,2017),新生代构造活动对其沉积 层序和油气运聚有重大影响(孙自明和沈杰,2014). 因此,探索博格达山北缘新生代的变形机制不仅对 研究北天山新生代扩展方式有重要意义,还可以为 该区域油气勘探提供依据.





F1. 三工河断裂; F2. 妖魔山断裂: F3. 阜康断裂; A1. 苦坝沟背斜; A2. 七道湾背斜; A3. 古牧地背斜; a. 研究区的大地构造位置; b 博格达山西 段构造纲要简图,修改自 Chen et al. (2015)和马德龙等(2017)

众多学者基于野外地质调查、地质和地震资料 解析、生长地层和热年代学分析等方法探究博格达 山北缘的构造特征及构造演化过程.研究结果显 示,该地区在时间上具有多旋回构造叠加的特点, 发育有明显的先存构造(Tang et al., 2014; Chen et al., 2015);在空间上呈现自山前基底卷入构造向 盆地区薄皮逆冲构造转换的特征(吴建华等,2002; 陈科等,2012;孙自明和王毅,2014).前人的物理模 拟和数值模拟实验结果表明,存在先存构造的位置 会优先发生构造活动(Sassi et al., 1993;刘恒麟等, 2022):滑脱层的分布特征、内聚力强度和厚度都对 褶皱冲断带变形的样式和传播范围有控制作用(吴 航等,2019;辛文等,2020;Li et al., 2021);存在双 滑脱层的情况下,上部滑脱层有利于构造变形的解 耦(Buiter, 2012; Graveleau et al., 2012). 博格达山 北缘中侏罗统西山窑组滑脱层和下侏罗统八道湾 组滑脱层的滑脱性能存在明显差异,可能在研究区 构造演化中起到重要作用(商琳等,2013;马德龙 等,2017).然而双滑脱层的内聚力强度及其差异在 褶皱冲断带变形中的作用尚未可知,先存构造和双 滑脱层在研究区新生代构造变形中的具体作用仍 待进一步研究.

本次研究针对博格达山北缘冲断带西段米泉 地区(图1b),采用离散元数值模拟方法,结合构造 解析和应力应变分析,通过控制变量法设计5组数 值模拟实验来探究先存构造和双滑脱层内聚力强 度对博格达山北缘新生代构造变形的影响,为该地 区构造变形特征研究和油气勘探提供依据.

1 地质背景

博格达山是天山的东北支,平均海拔4000 m 以上,东西向延伸超过250 km,总体上为向北凸出 的弧形复背斜(陈科等,2012).作为中亚造山带的一 部分,博格达山记录了3次主要的构造事件:古生代 与古亚洲洋闭合有关的碰撞和拼合、中生代欧亚大 陆陆内造山以及新生代印亚碰撞的远程效应(Tapponnier and Molnar, 1979; Şengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2004).关于博格达山的构造演化还存在 一些争议,但可以确定的是该地区至少在早侏罗世 就已经呈现正地貌特征(Greene *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2015;张妍等,2015),并在中生代持续变形 (沈传波等,2006),现今地形是晚中新世以来在古 造山带基础上强烈变形发育的继承性构造(王宗秀

和李涛,2004;Zhou et al., 2020). 博格达山广泛出 露中一上石炭统至新近系,该地区综合地层柱状图 如图2所示.中一上石炭统为一套海相中一基性侵 入岩和火山岩,主要出露在博格达山复背斜核部 (Tang et al., 2014). 二叠纪沉积环境由石炭纪的浅 海体系演变为滨岸体系,中一下二叠统主要由含有 腕足类和珊瑚化石的长石砂岩、粉砂岩、凝灰岩和 石灰岩透镜体组成,上二叠统主要为非海相碎屑沉 积物(Wartes et al., 2002). 三叠系呈现向上逐渐变 细的沉积旋回,下三叠统主要由红色砾岩和一些泥 质砂岩组成,中一上三叠统为灰绿色泥岩、泥质粉 砂岩和砂质泥岩夹砾岩,整体反映了水深增加和湖 泊扩张的环境(李忠和彭守涛,2013).侏罗系以砂、 泥岩沉积为主,层序保存完整,可划分为下侏罗统 八道湾组和三工河组,中侏罗统西山窑组和头屯河 组,以及上侏罗统齐古组和喀拉扎组,其中八道湾 组和西山窑组是研究区主要的构造滑脱层(商琳 等,2013).下部八道湾组(J₁b)厚约670m,夹薄煤 层,上部西山窑组(J_xx)厚约600m,富含煤层(郭召 杰等,2011;陈科等,2012),岩性特征表明两套滑脱 层的内聚力存在显著差异.不整合覆盖在侏罗系之 上的白垩系只在研究区北侧古牧地地区出露,主要 由灰绿色泥岩、砂岩组成.上覆新生界广泛分布在 博格达山的北麓,由陆相泥岩、砂岩和砾岩组成. 中一上二叠统、上三叠统、和中下侏罗统是该地区 主要的烃源岩层系(文志刚等,2005).

研究区位于山前褶皱冲断带,构造变形较为复 杂,地震反射资料品质差,导致前人对研究区深层 结构的认识存在较大的差异.对冲断带山前部分的 争议主要集中在断裂是否切穿基底,吴建华等 (2002)认为七道湾背斜及其深部构造属于基底卷 入构造;孙自明和王毅(2014)认为博格达山山前是 一系列沿二叠系滑脱层发育的逆冲推覆构造.冲断 带盆地部分发育深浅两套冲断系统,浅部沿中侏罗 统西山窑组滑脱层发育突破型断层传播褶皱(陈莹 莹等,2022),而深部构造样式存在不同认识:(1)深 部发育双重堆垛构造,具有统一的中侏罗统西山窑 组顶板,底部具有基底卷入成分(吴建华等,2002); (2) 深部发育构造三角带(孙自明和王毅, 2014); (3) 深部构造是以中侏罗统西山窑组和二叠系上芨 芨槽群芦草沟组为顶、底板的双重构造(商琳等, 2013);(4)根据贯穿古牧地背斜的长山1井的油气 来源判断双重构造未向下贯穿至二叠系,深部构造

年代地层				符号	岩性剖面 深度(1					
新生界	笛		新疆群	Q ₃ x	00000					
	第四	更新统	乌苏群	Q ₂ w						
	糸		西域组	$Q_1 x$	0 0 0 0 0 0	- 1000				
	新近系	上新统	独山子组	$N_2 d$						
		中新统	塔西河组	$N_1 t$		- 2 000				
			沙湾组	N ₁ s						
	古近系	渐新统	安集海河组		 ·····					
		始新统		E ₂₋₃ a	<u> </u>					
		古新统	紫泥泉子组	E ₁ z		- 3 000				
中生界	白垩系	上统	东沟组	K_2d	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •					
		下统	吐鲁谷群	K ₁ tg		- 4 000				
	侏罗系	上统	喀拉扎组	J ₃ k						
			齐古组	J_3q						
		中统	头屯河组	$J_2 t$		- 5 000				
			西山窑组	$J_2 x$						
		下统	三工河组	J ₁ s						
			八道湾组	J_1b		- 6 000				
	二叠云	中一上统	小泉沟群	$T_{2+3}Xq$						
	糸	下统	上苍房沟群	T_1Sc						
	二叠系	上纮	下苍房沟群	P_2Xc						
		1.91	上芨芨槽群	P_2Sj		7 000				
古生界		中一下统	下芨芨槽群	P_1Xj						
		石	炭系	С		- 8 000				
		000	•••	•	••••					
		砾岩	含砾砂岩 砂	L ·岩 光						
图 2 博格达山北缘综合地层柱状图										

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of northern Bogda Mountain 修改自马德龙等(2017);Zhou *et al.*(2017)



图 3 研究区典型剖面图 Fig.3 Typical geological profile of the study area 剖面位置见图 1

为以侏罗系西山窑组和八道湾组为顶、底板的双重 构造(邹会明,2017).本文综合前人的研究进展,根 据米泉1井、长山1井和牧6井的钻测井数据、地表 露头以及油气来源资料,在对研究区最新的二维和 三维地震资料解释的基础上,建立了横穿整个博格 达山北缘冲断带的地质剖面AA'(图3).

剖面自造山带向盆地方向呈现基底卷入构造 向薄皮滑脱构造转换的特征,在博格达山山前发育 三工河、妖魔山、米泉3条高角度基底断裂.野外观 测到的不整合特征及热年代学工作都揭示博格达 山及其北缘经历了多期构造隆升(Wartes et al., 2002;沈传波等,2006;朱文斌等,2006;汪新伟等, 2007;陈科等,2012;Tang et al., 2014),因此山前的 3条高角度基底断裂都经历了多期活动,对新生代 构造变形来说属于先存断裂.盆地区冲断带发生上 下变形解耦现象,浅部沿中侏罗统西山窑组煤系地 层滑脱发育断层传播褶皱,断面由南向北逐渐变陡 直至突破地表形成古牧地断裂,根据断裂上盘的生 长地层判断,断裂的主要活动时间在中新统之后 (商琳等,2013);深部是以中侏罗统西山窑组和下 侏罗统八道湾组煤系地层为顶、底板滑脱层的双重 构造,马德龙等(2017)认为深部双重构造的变形时 间主要为晚侏罗世一早白垩世和晚白垩世,这和米 泉地区最新三维地震剖面揭示的双重构造之上发 育白垩系和侏罗系、古近系和白垩系两个不整合面 是吻合的.

综上所述,侏罗系八道湾组和西山窑组煤系滑

脱层内聚力差异显著,可能对研究区新生代变形有 着重要影响;山前3条基底卷入断裂以及古牧地地 区深部双重构造在新生代之前就开始发育,对于新 生代变形来说属于先存构造,对研究区新生代构造 变形同样有控制作用.以横穿整个博格达山北缘冲 断带的地质剖面AA'为地质模型,本文在设置先存 构造的基础上,通过改变不同内聚力强度双滑脱层 组合,利用数值模拟实验探讨研究区新生代构造变 形特征及控制因素.

2 实验方法与模型设计

2.1 离散元方法原理

离散元(Discrete Element Method,简称DEM) 方法的基本思想是将材料视为由若干个离散单元 组成的初始弹性颗粒系统,通过给定合适的微观参 数来模拟不同材料的运动学和力学行为(Cundall and Strack, 1979),可以有效地模拟弹塑性形变,表 征非连续介质破裂和大尺度变形过程,已经被国内 外学者广泛应用于褶皱一冲断带构造变形过程及 机制的研究中(Hardy and Finch, 2005; Morgan, 2015;辛文等, 2020; Li *et al.*, 2021).

离散元数值模拟的计算主要是采用时间步进 的有限差分法,首先检索颗粒之间的接触关系,再 根据接触力学模型计算颗粒在某时刻*t*的受力情 况,进而采用跳蛙法求解牛顿力学方程,更新颗粒 在*t*+Δ*t*时的位置,完成一个时间步的计算,之后不 断循环上述步骤,直至计算结束.本文颗粒间接触 力计算采用Hertz-Mindlin接触模型,使用离散元数 值模拟软件VBOX完成实验(Lietal., 2018, 2021; 李长圣,2019),基于实验结果讨论先存断层和滑脱 层对博格达山北缘冲断带构造变形的控制作用.

2.2 实验模型设计

参考剖面AA'地质单元尺度、剖面长度、沉积序 列与地层厚度,设计了长50 km、高6.5 km的初始模 型.根据构造解析结果,在距挤压端0km、8km、 16 km 处分别设置 3条倾角 45°的基底卷入型先存断 层(F1、F2、F3),并根据断层活动性分别设置 2.5 km、2.5 km、0.5 km 高的基底抬升,在古牧地地 区侏罗系内设置4条倾角30°的先存断层(F4、F5、 F6、F7),用来模拟中生代先存构造.研究区存在上、 下两套滑脱层,为探究两套滑脱层的内聚力强度对 冲断带构造变形的影响,设计5组对比实验(图4). 实验1是不设置滑脱层的空白对照实验,实验2设 置两套强内聚力滑脱层,实验3将上部设置为强内 聚力滑脱层,下部设置为弱内聚力滑脱层(简称"上 强下弱"模型),实验4将上部设置为弱内聚力滑脱 层,下部设置为强内聚力滑脱层(简称"上弱下强" 模型),实验5设置两套弱内聚力滑脱层.为控制单 一变量,实验中滑脱层的厚度均设置为600m,下滑 脱层之下能干层厚1km,滑脱层之间能干层厚 0.8 km、上滑脱层之上能干层厚3.5 km,造山带根部 地层被基底卷入断层错断抬升,所以滑脱层从F3下 盘才开始设置,实验模型中灰色代表地层,红色代 表断层,黄色代表弱内聚力滑脱层,白色代表强内 聚力滑脱层,需要指出的是,内聚力强度越大的滑 脱层滑脱性越弱.

本文中实验参数的设置参照前人的双轴实验 结果(Morgan,2015),通过调整颗粒的细观参数及 颗粒间的粘结参数来构建不同的地质单元(表1). 实验中能干层的参数设置对应的岩石粘聚力*Co*为 19.0 MPa,内摩擦角 \$ 为19.3°(李长圣,2019).模型 左侧刚性挡板以2m/s的速度由南东向北西挤压, 时间步长0.05 s,总挤压量为15 km.

3 实验结果

3.1 实验1:无滑脱层模型

实验1是不设置滑脱层的空白对照试验,模拟 褶皱冲断带对先存构造的响应特征,记录运算 0 step、50 000 steps、100 000 steps 和 150 000 steps, 分别对应挤压缩短量0 km、5 km、10 km 和 15 km,



模拟结果如图 5 所示.当挤压量达 5 km 时,先存断 层 F1和F2率先活化使得断层上盘地层持续变形形 成背斜 a1和 a2,同时发育反冲断层 f8将 F1错断(图 5b).当挤压量达 10 km 时,先存断层 F3活化并冲出 地表,F3上盘形成多条次级反冲断层(图 5c).当挤 压量增加至 15 km,变形仍集中于冲断带根部,先存 断层 F4 至 F7基本未活化,前陆方向也未发生明显 变形(图 5d).

3.2 实验2:双强内聚力滑脱层模型

实验2在实验1的基础上设置两套强内聚力滑 脱层,记录运算0step、50000steps、10000steps和 150000steps,分别对应挤压缩短量0km、5km、 10km和15km,模拟结果如图6所示.当挤压量达 5km时,先存断层F1和F2率先活化使得断层上盘 地层持续变形形成背斜a1和a2,同时发育反冲断层 f8将F1错断(图6b).当挤压量达10km时,沿两套 滑脱层分别发生变形解耦,下滑脱层控制地层整体 的向前滑动,而上滑脱层控制上能干层的滑动和褶 皱变形,最终先存断层F4向上扩展并冲出地表,同 时在F4上盘形成反冲断层f9并构成箱型褶皱a3.先 表 1

离散元数值模拟实验参数

		Table 1	Experin	nental paran	neters of discre	te element nu	imerical simul	ation		
地质单元		颗	页粒的细观参	塗数		颗粒间的粘结参数				
	颗粒半径 (m)	剪切模量 (10 ⁹ Pa)	泊松比	摩擦系数	密度 (10 ³ kg/m ³)	杨氏模量 (10 ⁸ Pa)	剪切模量 (10 ⁸ Pa)	抗拉强度 (10 ⁷ Pa)	剪切强度 (10 ⁷ Pa)	色标
能干层	60/80	2.9	0.2	0.3	2.5	2.0	2.0	2.0	4.0	•
弱滑脱层	60/80	2.9	0.2	0.0	2.2	/	/	/	/	0
强滑脱层	60/80	2.9	0.2	0.1	2.2	/	/	/	/	0
断层	60/80	2.9	0.2	0.0	2.5	/	/	/	/	•
基底	60/80	2.9	0.2	0.4	2.5	2.0	2.0	2.0	4.0	0





Fig.5 Simulation results and structure explanation of Experiment 1

存断层F3也被卷入变形,但未向上扩展(图6c).当挤压量增加至15km,变形主要沿上滑脱层向前扩展,并在前端形成反冲断层f10,先存断层F5、F6和F7轻微活化(图6d).

3.3 实验3:"上强下弱"滑脱层模型

实验3在实验1的基础上设置强内聚力的上部 滑脱层和弱内聚力的下部滑脱层,记录运算0 step、 50 000 steps、100 000 steps和150 000 steps,分别对 应挤压缩短量0 km、5 km、10 km和15 km,模拟结 果如图7所示.当挤压量达5 km时,先存断层F1和 F2率先活化并在断层上盘分别发育反冲断层f8和 f9,形成背斜a1和a2(图7b).当挤压量达10 km时,

Fig.6 Simulation results and structure explanation of Experiment 2

变形迅速沿下滑脱层传播并沿先存断层 F4突破地 表,新发育的反冲断层 f10和 F4之间形成背斜 a3.先 存断层 F3在下滑脱层处被错断,未向上扩展(图 7c).当挤压量继续增加至 15 km,先存断层 F5至 F7 依次活化,变形沿下滑脱层持续向前传递并从 F6处 突破地表,形成背斜 a4(图 7d).整个变形过程中上 滑脱层未发挥作用.

3.4 实验4:"上弱下强"滑脱层模型

实验4在实验1的基础上设置弱内聚力的上部 滑脱层和强内聚力的下部滑脱层,记录运算0step、 50000steps、100000steps和150000steps,分别对 应挤压缩短量0km、5km、10km和15km,模拟结 果如图8所示.当挤压量达5km时,先存断层F1和



Fig.7 Simulation results and structure explanation of Experiment 3



Experiment 4

F2率先活化使得断层上盘地层持续抬升,同时发育 反冲断层 f8 将 F1 错断(图 8b).当挤压量达 10 km 时,先存断层F3重新活化并突破地表,F3上盘形成 反冲断层 f9,前陆方向沿两套滑脱层分别发生变形



解耦,下滑脱层控制地层整体的向前轻微滑动,而 上滑脱层控制上能干层强烈滑动和褶皱变形,沿上 滑脱层发育逆冲断层f10(图8c).当挤压量继续增加 至15km,上滑脱层继续发挥主要作用,上能干层沿 上滑脱层滑动并从断层f12冲出地表,在其上盘形 成反冲断层f13和背斜a4.先存断层F5至F7微弱活 化(图8d).

3.5 实验5:双弱内聚力滑脱层模型

实验5在实验1的基础上设置两套弱内聚力滑 脱层,记录运算0step、50000steps、10000steps和 150000steps,分别对应挤压缩短量0km、5km、 10km和15km,模拟结果如图9所示.当挤压量达 5km时,先存断层F1和F2率先活化使得断层上盘 地层持续抬升,同时发育反冲断层f8将F1错断(图 9b).当挤压量达10km时,沿两套滑脱层分别发生 变形解耦,下滑脱层控制地层整体的向前滑动,而 上滑脱层控制上能干层的滑动和褶皱变形,最终先 存断层F4向上扩展并冲出地表,同时在F4上盘形 成反冲断层f9并构成箱型褶皱a3,先存断裂F5也 开始重新活化(图9c).当挤压量继续增加至15km, 先存断层F6开始活化,上能干层继续沿上滑脱层向 前扩展,形成断层f10和背斜a4(图9d).

4 结果分析与讨论

实验1~5的模拟结果和体积应变对比如图10 所示,体积应变图中红色代表右行剪切,蓝色代表 左行剪切,颜色越深表示变形越强烈.对比各组实 验结果和实际剖面,探讨先存断层和双滑脱层对褶 皱冲断带构造变形的影响及对博格达山北缘冲断 带新生代演化过程的启示.

4.1 先存断层的影响

5组数值模拟实验结果显示,在挤压过程中,应 变主要是以先存断层活化的形式向前扩展,先存断 层吸收了大部分挤压缩短量,而新生断层大部分是 在先存断层上盘形成的反冲断层或者是先存断层 的延伸和扩展,先存断层对冲断带的变形样式起到 重要控制作用.实验1不存在滑脱层,先存断层F3 很快向上扩展并突破地表,而在实验2~5中,存在 滑脱层的情况下,应力优先沿滑脱层传播,F3的活 动性明显减弱(图10),先存断层的活动性在一定程 度上受到与之相交的滑脱层的影响.

4.2 双滑脱层的影响

对比5组实验的变形传播范围发现,实验1挤 压应变集中在冲断带根部,基本没有向前陆方向传 播(图10a2),而实验2~4应力均能通过滑脱层快速 向前陆方向传播(图10b2、10c2、10d2、10e2),滑脱 层是应力的快捷传播通道.

实验2双强内聚力滑脱层模型,应力同时沿两 套滑脱层传播,其中上滑脱层的应力传播速度明显 更快,传播距离也更远,控制着上能干层的远距离 滑移(图10b1、10b2).实验5双弱内聚力滑脱层模 型,相对于实验2应力传播更远,滑脱层活动性更 强,但其构造变形模式和实验2相似(图10e1、 10e2).对比结果显示,当两套相同强度滑脱层存在 的情况下,两套滑脱层都发挥作用,但应力优先沿 上滑脱层传播.

实验3"上强下弱"滑脱层模型,下滑脱层成为 变形扩展的唯一通道,上滑脱层基本没有起到拆离 作用(图10c1、10c2).实验4"下强上弱"滑脱层模 型,上滑脱层是主要的应变传播通道,而下滑脱层 有利于先存断层F4的活化,起到次要作用.因此,当



Fig.10 Comparison of simulation results and volume strain a1、a2对应实验1;b1、b2对应实验2;c1、c2对应实验3;d1、d2对应实验4;e1、e2对应实验5

存在两个不同内聚力滑脱层的情况下,应力会优先 沿弱内聚力滑脱层传递,当下滑脱层内聚力较弱 时,上滑脱层将基本不发挥作用.

4.3 对博格达山北缘冲断带构造变形的启示

博格达山北缘存在下侏罗统八道湾组和中侏 罗统西山窑组两套滑脱层(商琳等,2013),其中八 道湾组含煤条带和煤层,西山窑组富含煤层和煤 纹,符合"上弱下强"模型.将实际地质剖面与实验 结果对比发现,只有实验4的结果与实际地质剖面 最为吻合,图10a1、10a2、10a3、10a4模拟结果中与 实际地质剖面中的博格达冲断隆起、苦坝沟背斜、 七道湾背斜、古牧地背斜相对应,先存断层F1和F2 的强烈活化变形也对应新生代博格达山的剧烈隆 升(Chen et al., 2015).古牧地地区下部双重构造主 要在中生代活动,而上部背斜是沿西山窑组煤系滑 脱层长距离滑脱并在古牧地冲出地表形成的断层 传播褶皱(汪新伟等,2007;马德龙等,2017),模拟 实验4结果与该认识相吻合(图10d1、10d2).以上结 论说明先存断裂和双滑脱层的内聚力强度差异确 实对褶皱冲断带构造变形有重要影响,从实验结果 分析可知,下侏罗统八道湾组强内聚力滑脱层有助 于先存双重构造的复活,而中侏罗统西山窑组弱内 聚力滑脱层控制着浅部古牧地背斜的形成,两套滑 脱层共同控制盆地区冲断带深浅构造的变形解耦, 并且"上弱下强"的双滑脱层模式是控制研究区新 生代构造变形的关键因素.

4.4 实验模型的局限性

本文实验采用的离散元数值模拟方法能很好 地模拟弹塑性形变,表征剪切变形特征,但实际褶 皱冲断带构造变形过程受到更多复杂因素影响,如 盆山边界形态、基底性质差异等.本文采用的二维 模拟技术没有考虑冲断带沿走向的变化,实验设计 简化了地层岩性和产状,也没有考虑同构造沉积和 剥蚀的影响.此外,由于先存断层的产状和分布范 围难以准确厘定,故实验中先存断层的倾角和位置 取了估计值.虽然存在上述近似和简化,离散元数 值模拟实验仍然优化了物理模拟存在的比例化和 流变学的问题,可以体现出褶皱冲断带的几何学和 运动学特征及变形机制.

5 结论

通过离散元数值模拟的方法,本文模拟了先存 构造和不同内聚力强度双滑脱层组合对褶皱冲断 带构造变形的影响,结合博格达山北缘冲断带构造特征,讨论其新生代变形机制,主要结论如下:

(1) 滑脱层是应力传播的有利通道, 双滑脱层的内聚力强度是褶皱冲断带构造变形的重要控制因素.

(2)存在两套同等内聚力强度滑脱层的情况 下,应力优先沿上滑脱层传播。

(3)当两套滑脱层内聚力强度相差较大时,变 形优先沿弱内聚力滑脱层传播,尤其是当下滑脱层 内聚力强度较低时,上滑脱层可能不发挥作用.

(4)通过与地质模型对比,认为先存构造和"上 弱下强"的双滑脱层模式是控制博格达山北缘新生 代构造变形的关键因素.

致谢:本文的数值计算是在南京大学高性能计 算中心的计算集群上完成的,模拟实验使用的软件 为李长圣博士研发的离散元数值模拟软件 (https://geovbox.com),应变的处理参考了Julia Morgan提供的脚本,在此表示感谢.

References

- Avouac, J. P., Tapponnier, P., Bai, M., et al., 1993. Active Thrusting and Folding along the Northern Tien Shan and Late Cenozoic Rotation of the Tarim Relative to Dzungaria and Kazakhstan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B4): 6755-6804. https://doi. org/10.1029/92jb01963
- Buiter, S. J. H., 2012. A Review of Brittle Compressional Wedge Models. *Tectonophysics*, 530/531: 1-17. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.12.018
- Chen, K., Lin, W., Wang, Q. C., 2015. The Bogeda Shan Uplifting: Evidence from Multiple Phases of Deformation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 99: 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.12.006
- Chen, K., Wang, Z.Y., Liu, F., et al., 2012. The Structural Characteristics along the Northern Piedmont of Bogedashan and Its Dynamic Significances. *Chinese Journal* of Geology (Scientia Geologica Sinica), 47(4): 1041-1051(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.Y., Li, Y.Q., Wei, D.T., et al., 2022. Quantitative Relationship between Tectonic Deformation and Topography in Bogda Piedmont of Eastern Tianshan Mountains: Based on 3D Structural Modeling and Geomorphic Analysis. *Earth Science*, 47(2): 418-436 (in Chinese with English abstract).

Cundall, P. A., Strack, O. D. L., 1979. A Discrete Numeri-

cal Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, 29(1): 47-65. https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47

- Graveleau, F., Malavieille, J., Dominguez, S., 2012. Experimental Modelling of Orogenic Wedges: A Review. *Tectonophysics*, 538/539/540: 1-66. https://doi.org/ 10.1016/j.tecto.2012.01.027
- Greene, T. J., Carroll, A. R., Wartes, M., et al., 2005. Integrated Provenance Analysis of a Complex Orogenic Terrane: Mesozoic Uplift of the Bogda Shan and Inception of the Turpan-Hami Basin, NW China. Journal of Sedimentary Research, 75(2): 251-267. https://doi. org/10.2110/jsr.2005.019
- Guo, Z.J., Wu, C.D., Zhang, Z.C., et al., 2011. Tectonic Control on Hydrocarbon Accumulation and Prospect for Large Oil-Gas Field Exploration in the Southern Junggar Basin. *Geological Journal of China Universities*, 17(2): 185-195(in Chinese with English abstract).
- Hardy, S., Finch, E., 2005. Discrete-Element Modelling of Detachment Folding. Basin Research, 17(4): 507-520. https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2005.00280.x
- Jahn, B. M., Windley, B., Natal'in, B., et al., 2004. Phanerozoic Continental Growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599-603. https://doi.org/ 10.1016/s1367-9120(03)00124-x
- Kang, Z.L., 1997. Petroleum Prospect in the Southern Margin of Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 2(4): 31-34, 6(in Chinese with English abstract).
- Li, C.S., 2019. Quantitative Analysis and Simulation of Structural Deformation in the Fold and Thrust Belt Based on Discrete Element Method(Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Li, C. S., Yin, H. W., Jia, D., et al., 2018. Validation Tests for Discrete Element Codes Using Single-Contact Systems. *International Journal of Geomechanics*, 18(6): 06018011. https://doi. org/10.1061/(asce)gm. 1943-5622.0001133
- Li, C. S., Yin, H. W., Wu, C., et al., 2021. Calibration of the Discrete Element Method and Modeling of Shortening Experiments. *Frontiers in Earth Science*, 9: 636512. https://doi.org/10.3389/feart.2021.636512
- Li, Z., Peng, S.T., 2013. U-Pb Geochronological Records and Provenance System Analysis of the Mesozoic-Cenozoic Sandstone Detrital Zircons in the Northern and Southern Piedmonts of Tianshan, Northwest China: Responses to Intracontinental Basin-Range Evolution. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 739-755 (in Chinese with

English abstract).

- Liu, H.L., Li, Z.Q., Li, G., et al., 2022. Influences of Pre-Existing Structures on Future Growth and Geometry of Faults: A Case Study of Hongqi Sag, Hailar Basin. *Earth Science*, 47(7): 2646-2666(in Chinese with English abstract).
- Ma, D. L., He, D. F., Wei, D. T., et al., 2017. Multiple Phase Deformation of Gumudi Anticline at South Margin of Junggar Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition*), 47(6): 1695-1704 (in Chinese with English abstract).
- Morgan, J. K., 2015. Effects of Cohesion on the Structural and Mechanical Evolution of Fold and Thrust Belts and Contractional Wedges: Discrete Element Simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(5): 3870-3896. https://doi.org/10.1002/2014jb011455
- Sassi, W., Colletta, B., Balé, P., et al., 1993. Modelling of Structural Complexity in Sedimentary Basins: The Role of Pre-Existing Faults in Thrust Tectonics. *Tectonophysics*, 226(1/2/3/4): 97-112. https://doi. org/ 10.1016/0040-1951(93)90113-x
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299-307. https://doi.org/10.1038/364299a0
- Shang, L., Dai, J.S., Feng, J.W., et al., 2013. Geometric and Kinematic Analyses of Gumudi Anticline in Southern Margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 34(6): 627-631, 617 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Liu, L., et al., 2006. Evidence from Apatite and Zircon Fission Track Analysis for Mesozoic-Cenozoic Uplift Thermal History of Bogeda Mountain of Xinjiang, Northwest China. Marine Geology & Quaternary Geology, 26(3): 87-92 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z.M., Shen, J., 2014. Bogda Nappe Structure and Its Relations to Hydrocarbon in Xinjiang. *Petroleum Geolo*gy & *Experiment*, 36(4): 429-434, 458 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Z.M., Wang, Y., 2014. Structural Analysis and Modeling in Miquan Area of the Western Margin of the Bogda Mountain, Xinjiang. *Geoscience*, 28(2): 300-307 (in Chinese with English abstract).
- Tang, W. H., Zhang, Z. C., Li, J. F., et al., 2014. Late Paleozoic to Jurassic Tectonic Evolution of the Bogda

Area (Northwest China): Evidence from Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Tectonophysics*, 626: 144–156. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.04.005

- Tapponnier, P., Molnar, P., 1979. Active Faulting and Cenozoic Tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal Regions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B7): 3425-3459. https://doi.org/10.1029/ jb084ib07p03425
- Wang, G.C., Shen, T.Y., Chen, C., et al., 2020. Basin-Range Coupling and Tectonic Topography Analysis during Geological Mapping on Covered Area: A Case Study of Turpan-Hami Basin, Eastern Tianshan. *Earth Science*, 45(12): 4313-4331 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.W., Wang, X.W., Ma, Y.S., 2007. Differential Exhumation History of Bogda Mountain, Xinjiang, Northwestern China since the Late Mesozoic. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1507-1517(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.X., Li, T., 2004. Mechanism of Cenozoic Revival Orogeny in the Bogda Mountain Chain, Xinjiang. Bulletin of Geology of China, 23(3): 286-293 (in Chinese with English abstract).
- Wartes, M. A., Carroll, A. R., Greene, T. J., 2002. Permian Sedimentary Record of the Turpan-Hami Basin and Adjacent Regions, Northwest China: Constraints on Post Amalgamation Tectonic Evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 114(2): 131–152. https://doi. org/10.1130/0016-7606(2002)1140131:psrott>2.0.co;2
- Wen, Z.G., Hou, J.G., Zhang, B.Q., et al., 2005. Analysis on Hydrocarbon Accumulation Conditions and Evaluation of Exploration Potential in Miquan Block in the Southern Margin of Jungar Basin. Journal of Oil and Gas Technology, 27(1): 10-13, 141 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H., Qiu, N.S., Chang, J., et al., 2019. Physical Simulation on Development of Multilayer Detachment Fold Belt in Eastern Sichuan. *Earth Science*, 44(3): 784-797 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.H., Xiang, S.Z., Wu, X.Z., et al., 2002. Structures in East Part of Southern Margin in Junggar Basin and Their Formation Mechanism. *Xinjiang Petroleum Geol*ogy, 23(3): 208-210, 178(in Chinese with English abstract).
- Xin, W., Chen, H.L., An, K.X., et al., 2020. Analyzing the Influence of Factors That Control the Structural De-

formation of Fold-Thrust Belts in the Southwestern Tianshan Using Discrete Element Simulations. *Acta Geologica Sinica*, 94(6): 1704-1715 (in Chinese with English abstract).

- Yin, A., Nie, S., Craig, P., et al., 1998. Late Cenozoic Tectonic Evolution of the Southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 17(1): 1-27. https://doi. org/10.1029/ 97tc03140
- Zhang, Y., Li, Z.S., Nie, F., et al., 2015. Age, Provenance and Tectonic Evolution of Late Paleozoic Strata in Bogda Mountain, Xinjiang: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Chinese Journal of Geology* (*Scientia Geologica Sinica*), 50(1): 155-181 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. X., Wu, C. D., Yuan, B., et al., 2020. Cenozoic Tectonic Patterns and Their Controls on Growth Strata in the Northern Tianshan Fold and Thrust Belt, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 198: 104237. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104237
- Zhu, W.B., Shu, L.S., Wan, J.L., et al., 2006. Fission– Track Evidence for the Exhumation History of Bogda– Harlik Mountains, Xinjiang since the Cretaceous. Acta Geologica Sinica, 80(1): 16-22 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H.M., 2017.Study on the Tectonic Characteristics of the Western Section of the Fukang Fracture Zone in the Junggar Basin and Its Reservoir Control Role(Dissertation). China University of Petroleum, Beijing(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈科,王镇远,刘飞,等,2012.博格达山北缘前陆褶皱冲断 带构造特征及其动力学意义.地质科学,47(4):1041-1051.
- 陈莹莹,李一泉,魏东涛,等,2022.东天山博格达山前构造 变形与地形定量关系:基于三维建模与地貌分析.地球 科学,47(2):418-436.
- 郭召杰,吴朝东,张志诚,等,2011.准噶尔盆地南缘构造控 藏作用及大型油气藏勘探方向浅析.高校地质学报, 17(2):185-195.
- 康竹林, 1997. 准噶尔盆地南缘油气勘探前景. 勘探家, 2(4): 31-34, 6.
- 李长圣,2019.基于离散元的褶皱冲断带构造变形定量分析 与模拟(博士学位论文).南京:南京大学.
- 李忠,彭守涛,2013.天山南北麓中-新生界碎屑锆石U-Pb 年代学记录、物源体系分析与陆内盆山演化.岩石学

报,29(3):739-755.

- 刘恒麟,李忠权,李根,等,2022.先存构造对断层后期生长 及形态的影响:以海拉尔盆地红旗凹陷为例.地球科 学,47(7):2646-2666.
- 马德龙,何登发,魏东涛,等,2017.准噶尔盆地南缘古牧地 背斜多期构造变形特征.吉林大学学报(地球科学版), 47(6):1695-1704.
- 商琳, 戴俊生, 冯建伟, 等, 2013. 准噶尔盆地南缘古牧地背 斜几何学与运动学分析. 新疆石油地质, 34(6): 627-631, 617.
- 沈传波,梅廉夫,刘麟,等,2006.新疆博格达山中新生代隆 升-热历史的裂变径迹记录.海洋地质与第四纪地质, 26(3):87-92.
- 孙自明, 沈杰, 2014. 新疆博格达推覆构造及其与油气的关系. 石油实验地质, 36(4): 429-434, 458.
- 孙自明, 王毅, 2014. 新疆博格达山西缘米泉地区构造解析 与建模.现代地质, 28(2): 300-307.
- 王国灿,申添毅,陈超,等,2020.覆盖区地质调查中的盆山 构造地貌关系研究:以东天山一吐哈盆地为例.地球科 学,45(12):4313-4331.
- 汪新伟,汪新文,马永生,2007.新疆博格达山晚中生代以 来的差异剥露史.地质学报,81(11):1507-1517.

- 王宗秀,李涛,2004.新疆博格达山链新生代再生造山机理: 岩石圈内切层"开""合"造山带的典型代表.地质通报, 23(3):286-293.
- 文志刚, 侯建国, 张柏桥, 等, 2005. 准噶尔盆地南缘米泉区 块油气成藏条件分析与勘探潜力评价. 石油天然气学 报(江汉石油学院学报), 27(1): 10-13, 141.
- 吴航,邱楠生,常健,等,2019. 川东多套滑脱层褶皱构造带 形成物理模拟.地球科学,44(3):784-797.
- 吴建华,向书政,吴晓智,等,2002. 准噶尔盆地南缘东部构 造样式与形成机制.新疆石油地质,23(3):208-210,178.
- 辛文, 陈汉林, 安凯旋, 等, 2020. 基于离散元数值模拟的西 南天山山前冲断带构造变形控制因素研究. 地质学报, 94(6):1704-1715.
- 张妍,李振生,聂峰,等,2015.新疆博格达山晚古生代地层 的形成时代、物源及其演化:碎屑锆石 U-Pb 年代学证 据.地质科学,50(1):155-181.
- 朱文斌, 舒良树, 万景林, 等, 2006. 新疆博格达一哈尔里克 山白垩纪以来剥露历史的裂变径迹证据. 地质学报, 80 (1):16-22.
- 邹会明,2017.准噶尔盆地阜康断裂带西段构造特征及其控 藏作用研究(硕士学位论文).北京:中国石油大学.