

岩石力学参数影响断背斜内张裂缝发育带的概念模型

孙 帅^{1,2}, 侯贵廷¹

(1. 北京大学 地球与空间科学学院 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871;

2. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:在对库车坳陷克拉苏构造带内断背斜的构造裂缝研究中,发现断背斜内转折端发育张裂缝发育带,且张裂缝发育带的单井测试产量高,是断背斜内的油气高产区,深化研究张裂缝发育带及其影响因素对于油气勘探开发具有重要意义。前期工作发现张裂缝发育带受背斜“中和面”的控制,而岩石力学参数对断背斜内张裂缝发育带的影响还不清楚。因此,以库车坳陷克拉苏构造带内断背斜为背景,通过有限元数值模拟方法,建立了不同岩石力学参数的二维力学概念模型,分析了杨氏模量、泊松比和粘度比对张裂缝发育带的影响。结果表明:在杨氏模量大于70 GPa时,最大应变值随着杨氏模量增大而快速增大;随着杨氏模量的增加,张裂缝发育带的宽度和厚度总体上呈现线性增加的特征。在杨氏模量大于40 GPa条件下,随着泊松比增加,最大应变值和张裂缝发育带的宽度总体上缓慢增加。在粘度比小于25的情况下,最大应变值为0,不存在张裂缝发育带的宽度和张裂缝发育带的厚度;在粘度比大于25的情况下,最大应变值开始大于0且逐渐增大,张裂缝发育带的宽度和张裂缝发育带的厚度都随着粘度比的增加而增加。

关键词:杨氏模量;泊松比;粘度比;张裂缝发育带;二维力学;数值模拟;断背斜;库车坳陷

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Analysis of conceptual models for the influence of rock mechanics on tensile zone in faulted anticlines

Sun Shuai^{1,2}, Hou Guiting¹

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: The study on the structural fracture development in the faulted anticline in Kelasu tectonic zone, Kuqa Depression, reveals a tensile fracture zone developed in the hinge zone of the faulted anticline. And the flow rate from single-well test in the tensile fracture zone is high, indicating a prolific zone. Therefore, it is of great significance to oil/gas exploration and development to make an in-depth study on the tension fracture zone and its controlling factors. Our previous study reveals that the tensile fracture zone is controlled by neutral surfaces, but the influence of rock mechanics on the zone remains unclear. Then, we build several 2D mechanical conceptual models with different rock mechanical parameters through finite numerical modeling, for analyzing the influence of Young's modulus, Poisson ratio and viscosity ratio on the tensile fracture zone. The results show that: (1) when the Young's modulus is greater than 70 GPa, the maximum strain value grows rapidly with the increasing Young's modulus; both the width and thickness of the zone feature an overall linear growth with the increasing Young's modulus; (2) when the Young's modulus is greater than 40 GPa, the maximum strain value and width of the zone grow progressively with the increasing Poisson ratio; (3) when the viscosity ratio is less than 25, the maximum strain value comes to zero, and the width or thickness of the tensile fracture zone can be neglected; while when the viscosity ratio is greater than 25, the maximum strain value grows greater than zero and increases gradually, and so do the width and thickness of the zone.

收稿日期:2019-05-21; 修订日期:2020-03-23。

第一作者简介:孙帅(1992—),男,博士、工程师,构造地质与油气地质。E-mail:sunshuai@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:侯贵廷(1964—),男,博士、教授,构造地质与油气地质。E-mail:gthou@pku.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05051004)。

Key words: Young's modulus, Poisson ratio, viscosity ratio, tensile fracture zone, 2D mechanics, numerical modeling, faulted anticline, Kuqa Depression

对于裂缝的研究起步较早,于19世纪70年代就已经开始^[1-3]。裂缝对于地质体的孔隙度和密度具有很好的改善作用,为油气的运移和储存提供了必要的通道和储存空间,对致密砂岩、碳酸盐岩等低渗透储层以及致密泥页岩等非常规低渗透储层的物性具有重要的改善作用。构造裂缝是在岩石受力超过了其最大岩石强度而发生破裂形成的^[4],其发育程度主要取决于岩性^[5-10]、岩层厚度^[11-13]、断层^[14-17]和褶皱作用^[18-20]等因素的控制。此外,地质体或储集层的岩石力学参数对构造裂缝的发育也至关重要,主要包括杨氏模量、泊松比、抗压强度、粘度比等基本参数。关于岩石力学参数对构造裂缝发育影响的研究较少,且已有研究也多针对构造裂缝中的剪裂缝研究较多^[21-23],而针对张裂缝发育影响因素的研究很少。

近年来,在对库车坳陷克拉苏构造带内断背斜的勘探开发发现,白垩系巴什基奇克组的测井孔隙度、电阻率和地应力等物性在垂向上具有上下分带的现象,而且构造裂缝也存在上下分带性的现象,断背斜的上部发育张裂缝发育带,下部发育剪裂缝发育带,中间以过渡带分开^[24-25]。Sun等(2017)通过有限元数值模拟的方法研究断背斜内构造裂缝发育力学机制,并认为构造裂缝的发育受褶皱“中和面”和断层的共同控制,其中张裂缝发育带是受有限中和面(应变值等于0)约束的、应变值大于0的张应变区域^[24,26](图1)。而岩石力学参数对断背斜内张裂缝发育带的影响还不清楚,还需要进一步探讨。因此,以库车坳陷克拉苏构造的断背斜为背景,以白垩系巴什基奇克组上部的张裂缝发育带为对象,运用有限元数值模拟的方法,选取

杨氏模量、泊松比和粘度比3个岩石力学参数,探讨了岩石力学参数对张裂缝发育带的影响。

1 区域地质概况

库车坳陷位于中国西北部塔里木盆地北缘,北邻南天山造山带,南接塔北隆起,长约450 km,宽为20~60 km,面积约为28 500 km²,总体呈北东-东向展布(图2)。库车坳陷是一个中、新生代再生前陆盆地,经历了震旦纪的基底形成阶段、寒武纪—早奥陶世的被动大陆边缘阶段、中奥陶世—石炭纪的活动大陆边缘及造山阶段、二叠纪—三叠纪的前陆盆地演化阶段、侏罗纪—古近纪的湖盆发育阶段和新近纪以来的陆内挠曲盆地阶段,并形成了现今的构造地质格局^[27-28]。库车坳陷可以划分为3个构造带和2个凹陷,自北向南分别为北部单斜带、克拉苏-依奇克里克构造带、拜城凹陷、阳霞凹陷和秋里塔格构造带。

克拉苏构造带是库车坳陷北部第二排构造单元,研究区位于克拉苏构造带中部,东西长约70 km,南北宽约20 km,总体呈东西向展布(图2a)。研究区具有垂向分层的变形特征,由上而下分为盐上构造层、盐构造层和盐下构造层,其中盐下构造层的断背斜构造样式以同冲平缓背斜为主(图2b)。研究区中、新生界地层发育广泛,以两套滑脱层发育特征最为明显,分别为古近系库姆格列木群的膏岩层和侏罗系的煤层。两套滑脱层中间的白垩系巴什基奇克组,岩性以棕褐色、褐色中-细粒砂岩为主,夹含泥砾砂岩、泥质粉砂岩。巴什基奇克组的埋藏深度为6 000~8 000 m,岩层的孔

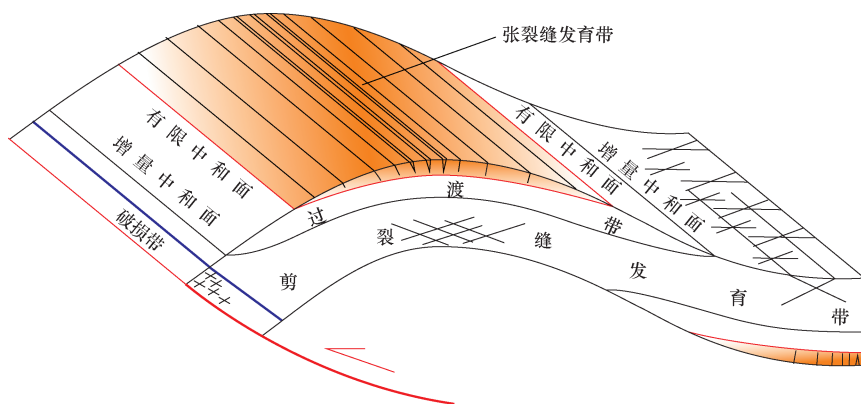


图1 库车坳陷克拉苏构造带内盐下断背斜发育张裂缝发育带(据文献[24]修改)

Fig. 1 The tensile fracture zone developed in the subsalt faulted anticline in Kelasu structural zone, Kuqa Depression(modified after reference[24])

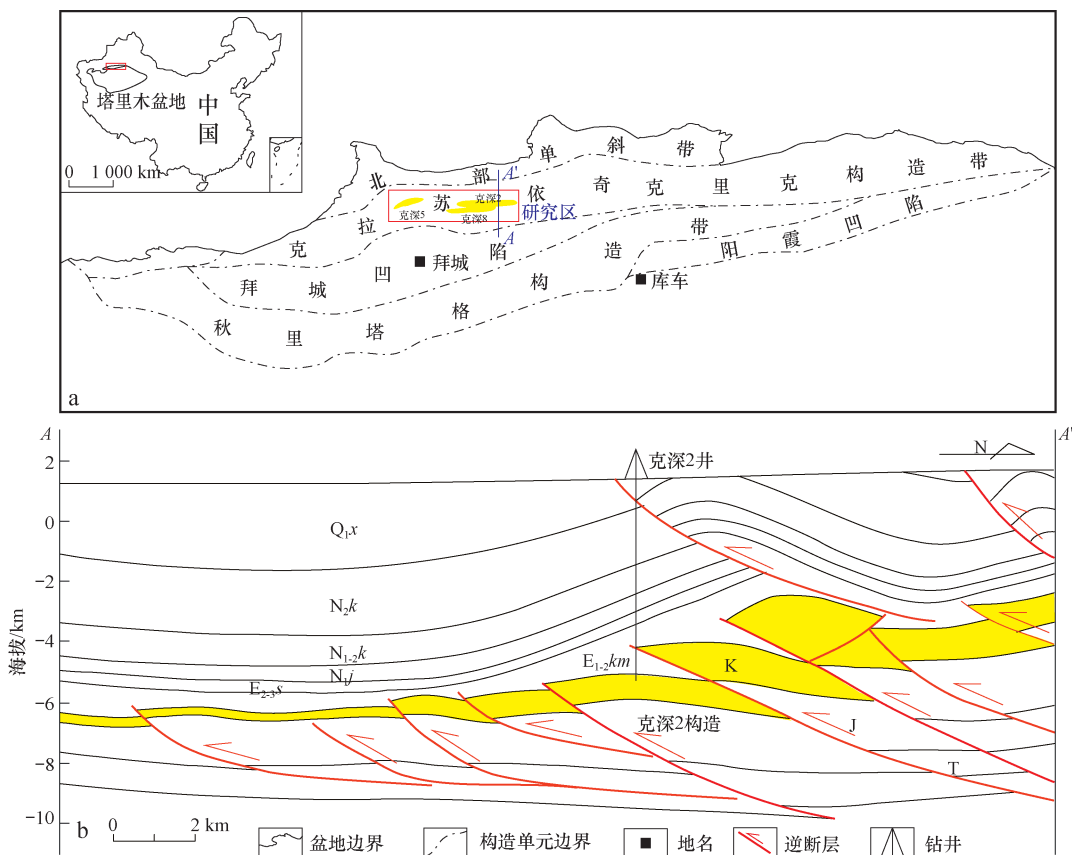


图2 库车坳陷构造单元划分(a)及研究区剖面示意图(b)

Fig. 2 The schematic diagram showing the structural unit division (a) of Kuqa Depression, and the geologic profile of the study area (b)

隙度、渗透率较低,渗透率为 $(0.01 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔隙度为8%^[25,30]。但是巴什基奇克组内构造裂缝广泛发育,尤其是背斜岩层上部的张裂缝,使油气勘探井获得高产,如克深2、克深5和克深8等,是库车坳陷山前冲断带油气勘探的目标储集层。

2 二维力学数值模拟

构造裂缝是在构造运动导致的构造应力场作用下形成的,构造裂缝的形成与构造应力场相关,应力场数值模拟是分析构造裂缝发育的重要手段。因此,运用ANSYS有限元数值模拟方法,通过建立断背斜的二维应力场概念模型,分析了不同岩石力学参数对构造应力场的影响,进而探讨了岩石力学参数对张裂缝发育带的影响。研究区内盐下断背斜以同冲平缓褶皱为主(图2b),因此,以同冲平缓褶皱为基础建立二维地质模型(图3)。将白垩系巴什基奇克组地层设置为一个薄板,嵌入在上部和下部的岩石力学性质较弱的围岩中。薄板长 L 为600 m,宽100 m,以及为了形成几何不稳定性而设置了初始正弦变形 $u_y = A \cos[(2\pi x/L + \pi)/2]$,

其中 A 为振幅75 m。断层设置为接触边界,两个离散面的摩擦系数设置为0.5。力学模型的建立方法与Sun等(2017)基本一致,但不同的是,应力场数值模型中,所有概念模型的左右边界施加相同的位移约束,更重要的是保持岩石力学参数是变化的。通过设置一系列不同的杨氏模量(E)、泊松比(ν)和粘度比(背斜与围岩介质的粘度之比),对岩石力学参数对应力场和张裂缝发育带的影响进行了系统性的分析(表1,表2)。

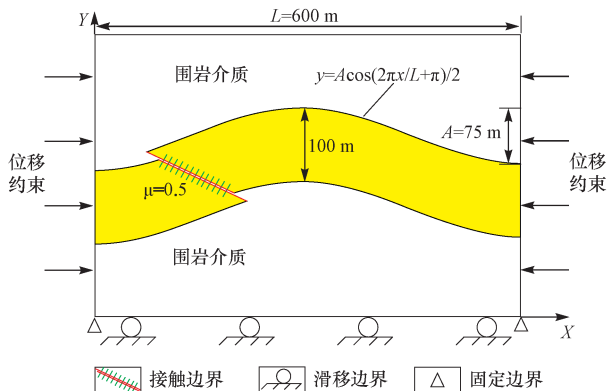


图3 数值概念模型的建立

Fig. 3 The building of the numerical conceptual models

表 1 不同杨氏模量、泊松比的概念模型及其模拟结果

Table 1 Conceptual models with different Young's modulus and Poisson ratios, and the numerical results

组号	模型号	泊松比	杨氏模量/GPa	最大应变值/ 10^{-5}	张裂缝发育带宽度/m	张裂缝发育带厚度/m
A	A ₁	0.10	10	4.5	112.4	7.5
	A ₂	0.10	25	5.4	115.0	7.5
	A ₃	0.10	40	6.5	118.6	8.4
	A ₄	0.10	55	7.9	122.1	9.3
	A ₅	0.10	70	9.9	124.0	9.3
	A ₆	0.10	85	13.2	129.2	10.1
	A ₇	0.10	100	40.6	129.3	10.1
B	B ₁	0.15	10	4.6	112.4	7.5
	B ₂	0.15	25	5.5	115.0	7.5
	B ₃	0.15	40	6.6	118.6	8.4
	B ₄	0.15	55	8.0	122.3	8.8
	B ₅	0.15	70	10.2	124.0	9.3
	B ₆	0.15	85	14.0	129.2	10.1
	B ₇	0.15	100	45.7	131.0	10.1
C	C ₁	0.20	10	4.6	112.4	7.5
	C ₂	0.20	25	5.5	115.0	7.5
	C ₃	0.20	40	6.7	118.6	8.4
	C ₄	0.20	55	8.3	122.5	8.7
	C ₅	0.20	70	10.7	124.8	9.3
	C ₆	0.20	85	15.2	129.2	10.1
	C ₇	0.20	100	52.7	131.0	10.1
D	D ₁	0.25	10	4.6	112.4	7.5
	D ₂	0.25	25	5.6	115.0	7.5
	D ₃	0.25	40	6.9	120.3	8.5
	D ₄	0.25	55	8.7	123.9	9.3
	D ₅	0.25	70	12.1	124.8	9.3
	D ₆	0.25	85	22.5	129.2	10.1
	D ₇	0.25	100	61.2	132.1	11.0
E	E ₁	0.30	10	4.7	112.4	7.5
	E ₂	0.30	25	5.8	115.0	8.4
	E ₃	0.30	40	7.3	120.3	8.5
	E ₄	0.30	55	9.5	125.7	9.3
	E ₅	0.30	70	13.2	127.4	10.1
	E ₆	0.30	85	35.7	129.2	10.1
	E ₇	0.30	100	72.6	132.8	11.0
F	F ₁	0.35	10	4.8	113.3	7.5
	F ₂	0.35	25	6.2	116.8	8.4
	F ₃	0.35	40	8.1	122.1	9.3
	F ₄	0.35	55	11.1	124.0	9.3
	F ₅	0.35	70	16.8	129.2	10.1
	F ₆	0.35	85	51.4	130.9	10.1
	F ₇	0.35	100	85.9	132.8	11.0
G	G ₁	0.40	10	5.0	113.3	7.5
	G ₂	0.40	25	7.0	118.6	8.4
	G ₃	0.40	40	9.9	124.0	9.3
	G ₄	0.40	55	14.9	127.6	10.1
	G ₅	0.40	70	26.6	129.2	10.1
	G ₆	0.40	85	70.1	132.7	11.0
	G ₇	0.40	100	101.5	136.3	11.0

表 2 不同粘度比的概念模型及其模拟结果

Table 2 Conceptual models with different viscosity ratios and their numerical results

组号	H								
模型号	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆	H ₇	H ₈	H ₉
泊松比	0.25								
杨氏模量/GPa	55								
粘度比	10	25	40	55	70	85	100	115	130
最大应变值/ 10^{-5}	0.0	0.0	4.8	9.3	11.9	13.7	14.6	16.4	16.4
张裂缝发育带宽度/m	0.0	0.0	89.4	123.9	141.6	149.5	158.5	161.1	167.2
张裂缝发育带厚度/m	0.0	0.0	2.6	8.7	15.9	23.4	31.4	39.5	47.7

研究区的巴什基奇克组砂岩的杨氏模量平均为 40 GPa,泊松比平均为 0.25。为了研究杨氏模量、泊松比和粘度比对应力场和张裂缝发育带的影响,设置围岩介质的岩石力学性质固定,其中杨氏模量为 5 GPa,泊松比为 0.35,并给背斜地层选取一定的岩石力学参数范围:1)背斜的杨氏模量取值范围为 10 ~ 100 GPa,步长为 15 GPa;2)背斜的泊松比的取值范围为 0.1 ~ 0.4,步长为 0.05;3)背斜与围岩介质的粘度比的取值范围为 10 ~ 150,步长为 15。而每一组模型中,只改变其中一个岩石力学参数,并保证其余参数不变,详见表 1 和表 2。A ~ F 共 7 组,合计 49 个模型,探讨杨氏模量和泊松比对应力场和张裂缝发育带的影响,例如 A₁ ~ A₇ 这 7 个模型为一组探讨杨氏模量对应力场和张裂缝发育带的影响,A₁,B₁,⋯,G₁ 这 7 个模型为一组探讨泊松比对应力场和张裂缝发育带的影响。粘度比对应力场和张裂缝发育带的影响,是基于基本模型参数(杨氏模量平均值 55 GPa、泊松比平均值 0.25),取不同的粘度比的值,共 1 组 9 个模型(H₁ ~ H₉)。

每一个模型的数值模拟,都可以得到每个模型的应力和应变分布,包括最大应变值、张裂缝发育带的厚度和张裂缝发育带的宽度,如图 4 为概念模型 A₃ 模拟出来的应变分布图。最大应变值是指断背斜内张应变区域的张应变最大值,最大应变值越大,说明该地区经受的张应变越强,张裂缝也就越发育;而张裂缝发育带厚度是指张应变区域垂向上的最大厚度,张裂缝发育带宽度是指张应变区域左右边界的横向长度。因此,张裂缝发育带的厚度和张裂缝发育带的宽度这两个参数更能够直观衡量出张裂缝发育带的分布范围,张裂缝发育带厚度越大、张裂缝发育带宽度越大,张裂缝的发育程度越高。

3 岩石力学参数对张裂缝发育带的影响

对每组模型的最大应变值、张裂缝发育带的宽度和张裂缝发育带的厚度与杨氏模型进行投点或拟合分

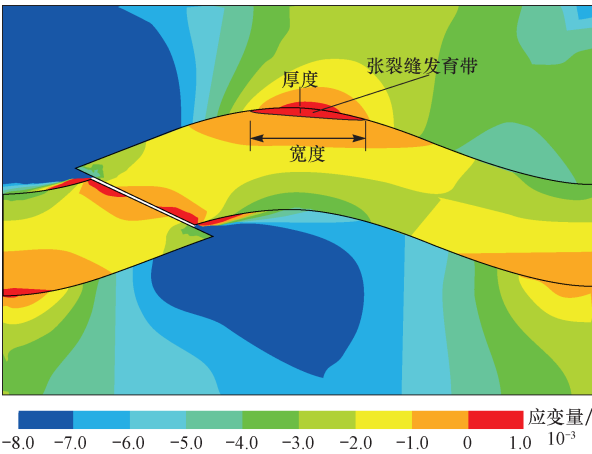


图 4 单个力学模型 A₃ 模拟计算出的应变分布

Fig.4 Strain contours calculated by the model A₃

注:红色代表应变值大于 0 的张应变,红色区域为张裂缝发育带

析,结果可以发现,最大应变值分布范围在 5 ~ 100 之内,且最大应变值与杨氏模量存在正相关关系,随着杨氏模量的增加,最大应变值逐渐增大(图 5a),也就意味着张裂缝更容易发育。在杨氏模量小于 70 GPa 的条件下,最大应变值随着杨氏模量增大而缓慢增长,张裂缝的发育程度增加不大,而在杨氏模量大于 70 GPa 的条件下,最大应变值随着杨氏模量增大而快速增大,张裂缝的发育程度迅速增加。此外,研究发现张裂缝发育带的宽度分布范围在 112 ~ 140 m,张裂缝发育带的宽度也与杨氏模量存在正相关关系,张裂缝发育带的宽度随着杨氏模量的增加总体上呈现线性增加的特征(图 5b),即杨氏模量越大,张裂缝发育带的分布越广。张裂缝发育带的厚度分布范围在 7.5 ~ 11 m,单组的结果分析发现张裂缝发育带的厚度与杨氏模量变化的规律不明显,但总共 7 组的数据拟合分析发现,张裂缝发育带的厚度与杨氏模量也存在正相关的关系: $y = 0.036x - 7.137R^2 = 0.89$ (图 5c),随着杨氏模量的增大,张裂缝发育带的厚度总体上逐渐增大,张裂缝发育带范围越大。

为了分析应力场和张裂缝发育带与泊松比的关

系,对不同泊松比条件下的最大应变值、张裂缝发育带的宽度和张裂缝发育带的厚度进行了投点或拟合分析。结果表明,最大应变值总体上随着泊松比的增加而缓慢增加(图6a),但在杨氏模量小于40 GPa情况下,泊松比对最大应变值影响很小,在杨氏模量大于40 GPa条件下,泊松比增加,最大应变值缓慢增加,也就意味着泊松比越大、张裂缝越容易发育。此外,通过张裂缝发育带的宽度与泊松比的关系图可以发现(图6b),张裂缝发育带的宽度总体上随着泊松比的增加而缓慢增加,泊松比越大,张裂缝发育带的分布范围越大。但是,在对张裂缝发育带的厚度与泊松比的关系分析中发现,二者的相关性较差,即泊松比对张裂缝发育带的厚度影响很小。

通过对模型 H_1-H_9 的应力场模拟结果分析,获得了最大应变值、张裂缝发育带的宽度和张裂缝发育带的厚度与粘度比的关系图(图7)。结果显示,当背斜与围岩介质的粘度比小于25时,最大应变值为0,断背斜内不存在张应变,不能形成张裂缝;当粘度比大于25时,最大应变值才开始大于0,断背斜内才开始存在张应变,才可能形成张裂缝;总体上,最大应变值随着粘度比的增加而逐渐增大,粘度比越大,越容易形

成张裂缝。此外,在粘度比小于25的条件下,背斜内都不存在张裂缝发育带的宽度和张裂缝发育带的厚度,没有形成张裂缝发育带;在粘度比达到25的情况下,断背斜内开始出现张裂缝发育带;粘度比大于25,张裂缝发育带的宽度和张裂缝发育带的厚度都随着粘度比的增加而增加,这也意味着张裂缝发育带分布范围随着粘度比的增加而增加。

研究表明杨氏模量越高,张裂缝发育带分布越广,张裂缝发育带与杨氏模量存在正相关的关系,在岩体受力、未变形的条件下,杨氏模量越高越脆、越不容易变形,在应力超过岩石抗张强度或抗剪强度时,岩石更易破裂形成裂缝和裂缝带;而值得注意的是,对于岩体发生变形的条件下,应变对破裂的形成也有一定的影响^[24,31-32],泊松比越大,岩体越容易变形,对于研究区的断背斜来说,泊松比的增大有利于断背斜顶部转折端区域的拉张,这也导致了应变最大值会随着泊松比的增大而增大、张裂缝发育带的宽度会随着泊松比的增大而增大。但是,可以发现最大应变值和张裂缝发育带宽度和厚度随着杨氏模量的变化较大,相对于杨氏模量而言,泊松比对张裂缝发育带的影响小很多(图5,图6)。

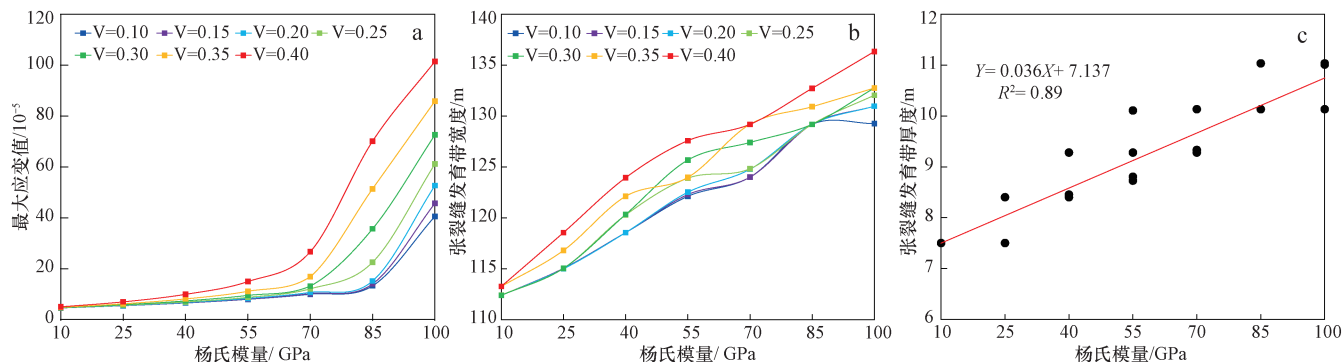


图5 杨氏模量与最大应变值(a)、张裂缝发育带宽度(b)和张裂缝发育带厚度(c)的关系

Fig. 5 Young's modulus vs. maximum strain value(a) and width(b) and thickness(c) of the tension fracture zone

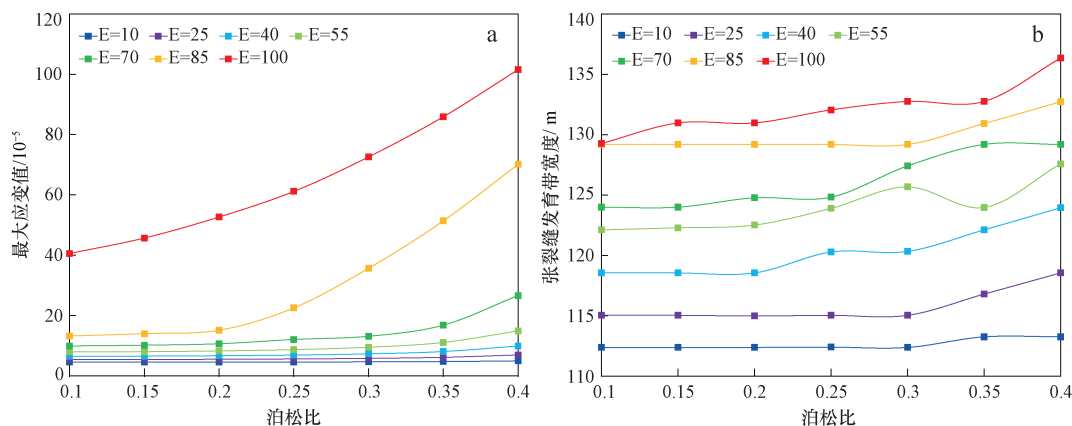


图6 泊松比与最大应变值(a)和张裂缝发育带宽度(b)的关系

Fig. 6 Poisson ratio vs. maximum strain value(a) and width of the tension fracture zone(b)

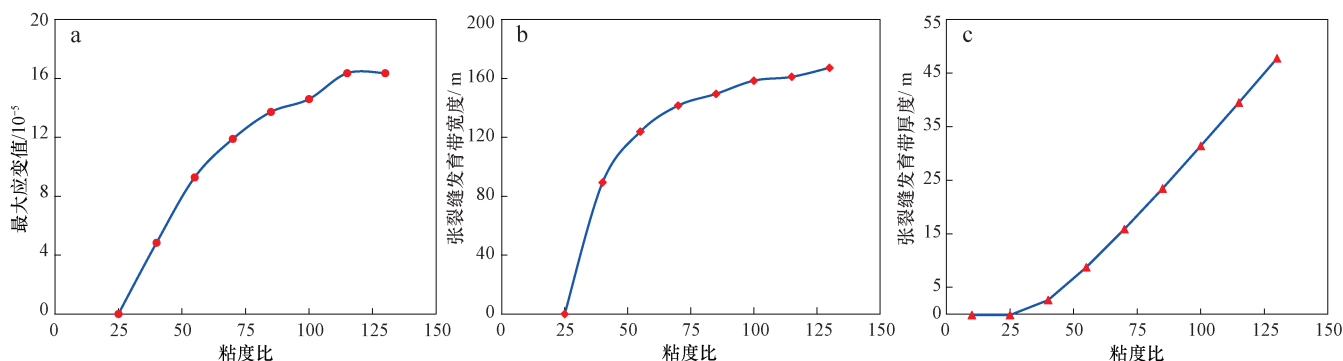


图7 粘度比与最大应变值(a)、张裂缝发育带宽度(b)和张裂缝发育带厚度(c)的关系

Fig. 7 Viscosity ratio vs. maximum strain value(a) and width(b) and thickness(c) of the tension fracture zone

综合以上分析,随着杨氏模量的增加,最大应变值逐渐变大,张裂缝发育程度增加,张裂缝发育带的宽度和厚度逐渐变大,张裂缝发育带分布范围更广;随着泊松比的增加,最大应变值和张裂缝发育带的宽度均缓慢增加,张裂缝更发育;随着粘度比的增加,达到某定值后张裂缝发育带开始出现,之后最大应变值迅速增大,张裂缝更加发育,张裂缝发育带的宽度和厚度均逐渐增加,张裂缝发育带分布范围变大。

4 结论

基于库车坳陷克拉苏构造带内断背斜,通过有限元数值模拟的方法,建立了58个二维力学概念模型,在只考虑单一岩石力学参数变化情况下,研究了岩石力学参数对断背斜应力场的影响,进而探讨了不同岩石力学参数对断背斜内张裂缝发育带的影响。其中,岩石力学参数包括杨氏模量、泊松比和粘度比。研究表明,岩石力学参数会影响断背斜内张裂缝发育带的分布及其发育程度。

1) 随着杨氏模量的增加,最大应变值逐渐变大,张裂缝发育程度越高;张裂缝发育带的宽度和厚度逐渐变大,张裂缝发育带分布范围更广。

2) 随着泊松比的增加,最大应变值和张裂缝发育带的宽度均缓慢增加,张裂缝越发育、张裂缝发育带宽度越大。

3) 随着粘度比的增加,最大应变值迅速增大,张裂缝发育程度增大;张裂缝发育带的宽度和厚度均逐渐增加,张裂缝发育带范围逐渐变大。

参 考 文 献

- [1] King W. Report on the superinduced divisional structure of rocks, called jointing, and its relation to slaty cleavage[J]. The Transactions of the Royal Irish Academy, 1875, 25: 605–662.
- [2] Mc Gee W J. Note on Jointed structure[J]. American Journal of

Science, 1883, 125: 153.

- [3] Becker G F. Finite homogeneous strain, flow and rupture of rocks [J]. Geological Society of America Bulletin, 1892, 4(1): 13–90.
- [4] Pollard D D, Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(8): 1181–1204.
- [5] 周新桂, 张林炎, 范昆. 油气盆地低渗透储层裂缝预测研究现状及进展[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 777–782.
Zhou Xingui, Zhang Linyan, Fan Kun, et al. The research situation and progresses of natural fracture for low permeability reservoirs in oil and gas Basin [J]. Geological Review, 2006, 52(6): 777–782.
- [6] 曾联波, 李跃纲, 张贵斌, 等. 川西南部上三叠统须二段低渗透砂岩储层裂缝分布的控制因素[J]. 中国地质, 2007, 4: 84–89.
Zeng Lianbo, Li Yuegang, Zhang Guibin, et al. Controlling factors for fracture distribution in the low-permeability sandstone reservoir of the Second Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the South of Western Sichuan [J]. Geology in China, 2007, 34(4): 84–89.
- [7] 杨东兴. 东濮凹陷泥页岩油气藏裂缝发育主控因素分析[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(3): 45–47.
Yang Dongxing. Main controlling factors of shale reservoir fracture development in Dongpu sag [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(3): 45–47.
- [8] 门晶璇, 宋哲. 沾化凹陷古近系—新近系沉积岩裂缝形成研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(6): 45–48.
Men Jingxuan, Song Zhe. Fracture formation in Paleogene-Neogene sedimentary rocks of Zhanhua sag [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(6): 45–48.
- [9] Zahm C K, Hennings P H. Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1427–1446.
- [10] Ju Wei, Sun Weifeng. Tectonic fractures in the Lower Cretaceous Xiaogou Formation of Qingxi Oilfield, Jiuxi Basin, NW China Part one: Characteristics and controlling factors [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 146: 617–625.
- [11] Mc Quillan H. Small-scale fracture density in Asmari Formation of southwest Iran and its relation to bed thickness and structural setting [J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(12): 2367–2385.
- [12] Bai T, Pollard D D. Fracture spacing in layered rocks: a new explanation based on the stress transition [J]. Journal of Structural Geology,

- 2000,22(1):43-57.
- [13] Underwood C A, Cooke M L, Simo J A, et al. Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian dolomite, northeastern Wisconsin [J]. AAPG bulletin, 2003, 87(1):121-142.
- [14] Torabi A, Berg S S. Scaling of fault attributes: A review [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(8):1444-1460.
- [15] 邱登峰, 云金表, 刘全有, 等. 不同边界条件断层端部应力集中效应及对裂缝发育的启示 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1):205-214.
- Qiu Dengfeng, Yun Jinbiao, Liu Quanyou, et al. The stress concentration effect at fault end under various boundary conditions and its implications for fracture development [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1):205-214.
- [16] 张继标, 张仲培, 汪必峰, 等. 塔里木盆地顺南地区走滑断裂派生裂缝发育规律及预测 [J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5):955-963.
- Zhang Jibiao, Zhang Zhongpei, Wang Bifeng, et al. Development pattern and prediction of induced fractures from strike-slip faults in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5):955-963.
- [17] Ju Wei, Hou Guiting, Zhang Bo. Insights into the damage zones in fault-bend folds from geomechanical models and field data [J]. Tectonophysics, 2014, 610:182-194.
- [18] Stearns D W. Certain aspects of fracture in naturally deformed rocks [C]//Rock mechanics seminar. Terrestrial Sciences Laboratory Bedford, 1968, 1:97-118.
- [19] Ghosh K, Mitra S. Structural controls of fracture orientations, intensity, and connectivity, Teton anticline, Sawtooth Range, Montana [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8):995-1014.
- [20] Frehner M. The neutral lines in buckle folds [J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33(10):1501-1508.
- [21] 岳喜伟, 戴俊生, 王珂. 岩石力学参数对裂缝发育程度的影响 [J]. 地质力学学报, 2014, 4:372-378.
- Yue Xiwei, Dai Junsheng, Wang Ke. Influence of Rock Mechanics Parameters on Development of Fractures [J]. Journal of Geomechanics, 2014, 4:372-378.
- [22] Liu Xiaolong, Eckert A, Connolly P. Stress evolution during 3D single-layer visco-elastic buckle folding: Implications for the initiation of fractures [J]. Tectonophysics, 2016, 679:140-155.
- [23] 陈文滨, 姜汉桥, 李俊键, 等. 张裂缝和剪裂缝应力敏感差异对致密砂岩储层产能影响 [J]. 特种油气藏, 2018, 25(5):146-150.
- Chen Wenbin, Jiang Hanqiao, Li Junjian, et al. Influence of stress sensitivity difference between tensile and shearing cracks on tight gas reservoir productivity [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5):
- [24] Sun Shuai, Hou Guiting, Zheng Chunfang. Fracture zones constrained by neutral surfaces in a fault-related fold: Insights from the Kelasu tectonic zone, Kuqa Depression [J]. Journal of Structural Geology, 2017, 104:112-124.
- [25] Li Yong, Hou Guiting, Hari K R, et al. The model of fracture development in the faulted folds: The role of folding and faulting [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 89:243-251.
- [26] Sun Shuai, Hou Guiting, Zheng Chunfang. Prediction of tensile fractures in KS2 trap, Kuqa Depression, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101:108-116.
- [27] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律 [J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3):177-183.
- Jia Chengzao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3):177-183.
- [28] 刘和甫, 汪泽成, 熊保贤, 等. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析 [J]. 地学前缘, 2000, 7(3):55-72.
- Liu Hefu, Wang Zecheng, Xiong Baoxian, et al. Coupling analysis of mesozoic-cenozoic foreland basin and mountain system in central and western China [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3):55-72.
- [29] 汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等. 库车前陆褶皱-冲断带前缘大型盐推覆构造 [J]. 地质学报, 2004, 78(1):17-25.
- Tang Liangjie, Jin Zhijun, Jia Chengzao, et al. A large-scale salt nappe complex in the leading edge of the Kuqa foreland fold-thrust belt, Tarim Basin, Northwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1):17-25.
- [30] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价—以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2):158-167.
- Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, Yang Haijun, et al. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: A case study of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu tectonic zone in Kuqa Foreland Basin, Tarim, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2):158-167.
- [31] 丁中一, 钱祥麟, 霍红. 构造裂缝定量预测的一种新方法—二元法 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1):1-14.
- Ding Zhongyi, Qian Xianglin, Huohong. A new method for quantitative prediction of tectonic fracture—two factors method [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(1):1-7.
- [32] Zhao Wentao, Hou Guiting. Fracture prediction in the tight-oil reservoirs of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, northern China [J]. Petroleum Science, 2017, 14(1):1-23.

(编辑 董立)