文章编号:1673-9469(2023)03-0040-06 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.006

岩石塑性对超深储层裂缝闭合的影响研究

赵 兵[1,2],纪 成[1,2],刘子寒[3],韦选纯[3],张振南[3*]

(1.中国石化缝洞型油藏提高采收率重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;2.中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院,新疆 乌鲁木齐 830011;3.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

摘要:为了分析岩石塑性对生产过程中裂缝闭合的影响,在Herz接触模型基础上,采用Drucker-Prager屈服准则,建立了弹塑性裂缝闭合模型,分析了不同地应力和岩石塑性参数对裂缝闭合行为的影响。结果表明:弹性模量、硬化参数和粘聚力是影响塑性裂缝闭合的关键因素。粘聚力越大,初始屈服应力就越大。硬化参数与弹性模量的比值越大,后继屈服应力越大,裂缝闭合塑性效应越弱。另外,地应力对裂缝闭合也有较大的影响,在裂缝面法向上的正应力越大,裂缝闭合塑性效应系数越高。

关键词:超深储层;弹塑性;裂缝闭合;接触模型;数值模拟

中图分类号:TG333.17 **文献标识码**:A

Research on the Influence of Rock Plasticity on Fracture Closure in Ultra Deep Reservoirs

ZHAO Bing[1,2], JI Cheng[1,2], LIU Zihan[3], WEI Xuanchun[3], ZHANG Zhennan[3*]

(1. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery for Carbonate Fracture-Cavity Reservoirs, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. SINOPEC Engineering Technology Institute of Northwest Oilfield Branch Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to analyze the impact of rock plasticity on crack closure during production, an elastic-plastic crack closure model was established using the Drucker Prager yield criterion based on the Herz contact model. The effects of different in-situ stresses and rock plasticity parameters on the crack closure behavior were analyzed. The results indicate that the elastic modulus, hardening parameters, and cohesion are key factors affecting the plastic crack closure. The greater the cohesion, the greater the initial yield stress. The larger the ratio of hardening parameters to the elastic modulus is the greater the subsequent yield stress, and the weaker the plastic effect of crack closure. In addition, the in-situ stress also has a significant impact on crack closure. The higher the normal stress in the normal direction of the crack surface, the higher the plastic effect coefficient of crack closure.

Key words: ultra-deep reservoir; elastoplastic; crack closure; contact model; numerical simulation

塔里木盆地顺北油藏埋深大(7 500~9 000 m)、地温高(160 ℃~200 ℃)、非均质性强,属于超深、超高温高压裂缝型断控油藏[1]。在高温高压条件下,深部储层岩石不同于常规地层[2],表现出很强的塑性。岩石的塑性流动将加剧裂缝闭合,导致油井减/停产。但是高温高压条件下的岩石塑性到底对裂缝闭合有多大影响,影响程度与岩石力学参数关系是什么,这些问题至今尚未清楚。围绕高温高压下的岩石力学性质已有诸多学者开展了研究。例如,席道瑛等[3]对花岗岩、大理岩和砂岩进行了控温实验,发现温度的增大会使得岩石的弹性模量和波速下降。许锡昌等[4]通过实验测

收稿日期:2023-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12172225)

作者简介:赵兵(1983-),男,四川遂宁人,硕士,副研究员,从事酸化压裂增产技术及岩石断裂数值模拟方面的研究。

*通讯作者:张振南(1974-),男,黑龙江木兰人,博士,教授,从事岩石断裂破坏力学与数值模拟研究。

定了不同温度下的花岗岩弹性模量、泊松比和单轴抗压强度,发现温度升高会使花岗岩的模量和强度降低、泊松比增大。然而,高温作用只是深部地层的特征之一,要深入了解深部地层岩石力学特性,还需要考虑超深储层的高压特征。围绕高温高压条件下的岩石力学问题,一些学者开展了实验研究。Zhang 等[5]通过三轴压缩试验发现高温高压下大理岩由应变软化转变为应变硬化、砂岩由脆性转变为应变软化;Zhao 等[6]对花岗岩、糜棱岩进行了高温高压三轴压缩试验,发现岩石由脆性破坏转变为延性破坏。Liu 等[7]通过高温高压试验发现了花岗岩和砂岩在特定温度下会发生脆塑性转化,并指出温度效应对岩石的物理性质影响比力学性质更大。这些研究为揭示地层条件下的岩石塑性行为提供了重要实验依据。为了更好地分析超深岩石塑性力学行为,还需要对高温高压条件下的岩石进行本构建模。一些学者在经典弹塑性理论框架内发展了岩石弹塑性本构模型,如文献[8-9]等。这类模型能较好地反映初期岩石应力-应变关系,但由于未考虑屈服面的变化,因而较难刻画岩石峰后的软化/硬化行为。为了进一步改进岩石弹塑性本构模型,一些学者通过引入内变量来反映应变硬化/软化特征,建立了可以考虑应变硬化/软化性质的弹塑性本构模型,例如,在 Mohr-Coulomb 准则中将黏聚力和内摩擦角与内变量建立联系来反映应变硬化/软化,从而描述岩石的弹塑性本构关系[10]。岩石弹塑性变形往往伴随着微观断裂的发生,为了在弹塑性本构关系中蕴含断裂机理,Thiagarajan 等[11]在虚内键(VIB)本构模型[12]中考虑了塑性。最近,刘子寒等[13-14]又将拓展虚内键(AVIB)[15]扩展到弹塑性问题,有效地模拟了高温高压条件下的岩石弹塑性力学行为。

然而,以上这些实验和理论研究还不足以分析岩石裂缝闭合的塑性效应。裂缝表面是粗糙的,由一些凸起支撑使得裂缝具有一定的张开度。随着生产进行,地层压力下降,闭合压力增加,这些凸起会发生塑性变形,从而加剧裂缝的闭合程度。为了有效地分析裂缝闭合行为,还需要在弹塑性本构基础上建立合理的裂缝闭合模型。为此,本文基于 Hertz 接触本构,采用 Drucker-Prager 屈服准则,建立了弹塑性裂缝闭合模型,用以分析塑性对裂缝闭合的影响,为实际工程中的超深储层裂缝导流能力评估提供依据。

1　弹塑性裂缝闭合模型

碳酸盐岩储层经过酸压后会形成复杂的裂缝网络。酸蚀裂缝表面几何形态是影响裂缝导流能力的重要因素,因此,对裂缝表面几何形态特征表征是后续研究的前提。牟建业等[16]认为酸蚀裂缝表面如图 1(a)所示;白翔[17]通过试验获得了酸蚀裂缝形态,经过三维扫描可见岩样表面“支柱”发育,见图 1(b);龚明[18]给出酸压裂缝三维示意图,见图 1(c)。

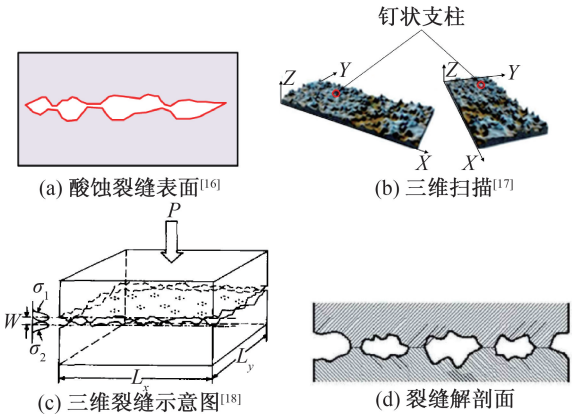

图 1　酸蚀裂缝几何形态

Fig. 1　Geometric morphology of acid corrosion cracks

根据图 1 所示的裂缝表面几何特征可以看出裂缝张开度具有随机性。为了定量地刻画裂缝初始张开度,一般假定裂缝张开度满足特定的概率分布规律。根据文献[19],Gamma 分布更适合于描述裂缝张开度,因而,本文采用 Gamma 分布作为裂缝张开度的概率模型。如图 1(b)所示,裂缝壁面是粗糙的,其上具有很多不规则凸起,这些凸起支撑裂缝,使得裂缝在闭合压力作用下并不完全闭合。取一局部裂缝微段作为研究对象,裂缝面接触可以抽象为两个半球体接触问题,如图 2 所示。

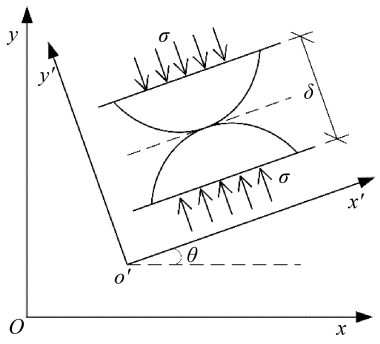

图 2　裂缝接触模型

Fig. 2　Contact model of crack

这一接触问题可以由 Hertz 接触模型来描述,其力与变形关系为

$$f_{\mathrm{n}} = K_{\mathrm{n}} \cdot \delta_{\mathrm{n}}^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

式中,f_{n} 为节理面法向力;K_{n} 为节理面法向刚度;δ_{n} 为节理面法向位移。

在图 2 所示的裂缝微段局部坐标系中,依据式(1)可类似地用如下应力-应变关系对其进行描述。

$$\sigma = E\bar{\varepsilon}^{\frac{3}{2}} \tag{2}$$

式中,σ 为裂缝单元的法向应力,MPa;E 为杨氏模量,GPa;$\bar{\varepsilon}$ 为接触单元归一化法向应变,$\bar{\varepsilon} = \varepsilon/\varepsilon_{\mathrm{c}}$,$\varepsilon_{\mathrm{c}}$ 为单元的临界抗压应变。其应力应变关系与线弹性岩石对比如图 3 所示。随着应变增大,接触面积也越大,其切线模量也越高,这符合受压节理的力学行为。

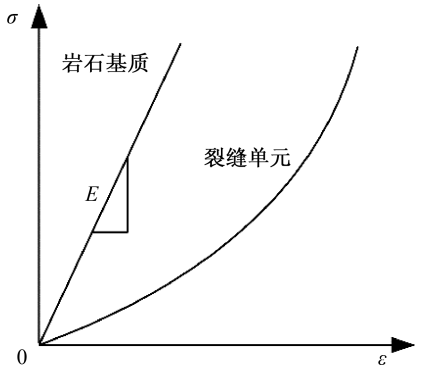

图 3 裂缝单元与岩石基质单元应力应变关系对比示意图

Fig. 3 Stress-strain relationship comparison between crack element and rock matrix element

为了获得切线模量,对式(2)进行微分,可得:

$$\mathrm{d}\sigma = \frac{3}{2}E\bar{\varepsilon}^{\frac{1}{2}}\mathrm{d}\bar{\varepsilon} \tag{3}$$

由式(3)可得等效切线模量为

$$E' = \frac{3}{2}E\bar{\varepsilon}^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

考虑到裂缝单元的切向刚度较小,因而可以假定裂缝单元只在法向上有抗力,而在切向上没有抗力,相当于“单轴压缩”问题。基于此假设,可得局部坐标系下的切线弹性矩阵 $\boldsymbol{D}'$。

$$\boldsymbol{D}' = \frac{E'}{1-v}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中,E' 为裂缝单元的等效切线模量,v 为材料泊松比。

由式(3)可得局部坐标系下的增量型弹性裂缝接触本构方程为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{D}'\mathrm{d}\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}' \tag{6}$$

在深部地层中,岩石基质会由弹性状态向塑性状态转化。采用 Drucker-Prager 准则作为屈服准则,建立如下弹塑性本构关系。

$$F = F(\boldsymbol{\sigma},\kappa) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k - f(\kappa) \tag{7}$$

其中:α,k 为模型参数,$\alpha = 2\sin\phi/[\sqrt{3}(3-\sin\phi)]$,$k = 6c\cos\phi/[\sqrt{3}(3-\sin\phi)]$;$I_1$ 为应力张量第一不变量;J_2 为应力偏量第二不变量;$f(\kappa)$ 为后继屈服应力;c,ϕ,κ 分别为粘聚力、内摩擦角和内变量,κ 一般定义为塑性功 $\kappa = \int \boldsymbol{\sigma}:\mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_p$。

当接触单元达到屈服条件时,单元进入塑性状态,其应力应变关系变为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{D}'_{ep}d\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}' \tag{8}$$

式中,弹塑性矩阵为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{D}'_{ep} &= \boldsymbol{D}' - \boldsymbol{D}'_p \\ \boldsymbol{D}_p &= \frac{\boldsymbol{D}[\partial G/\partial\boldsymbol{\sigma}][\partial F/\partial\boldsymbol{\sigma}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}}{[\partial F/\partial\boldsymbol{\sigma}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}[\partial G/\partial\boldsymbol{\sigma}] + H} \end{aligned} \tag{9}$$

式中:H 为塑性强化参量,$H = E_{\mathrm{T}}/(1-E_{\mathrm{T}}/E)$,其中 E 为材料单轴应力应变曲线的弹性模量;E_{T} 为切线模量;G 为塑性流动势,本文采用关联流动法则,即:$G = F$。根据文献[20]可知,岩石在高温高压条件下是应变硬化材料,所以在弹塑性本构关系中可以考虑硬化模型。

根据上式得到接触单元局部刚度矩阵后,再通过如下坐标变换,得到整体刚度矩阵,从而可以进行求解。

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}'\boldsymbol{Q} \tag{10}$$

其中:$\boldsymbol{K}'$,$\boldsymbol{K}$ 分别为局部和整体刚度矩阵;$\boldsymbol{Q}$ 为整体到局部坐标变换矩阵。

2 模拟分析

为了有效地研究岩石塑性对裂缝张开度的影响,本文不失一般性地对单一裂缝进行研究。计算模型如图 4(a)所示,模型尺寸为 100 m × 50 m,模型边界网格稀疏、中间网格加密,共划分 82 828 个单元、41 512 个节点。模型垂向受水平小主应力 σ_h = 120 MPa,左右受水平大主应力 σ_H = 140 MPa。单条裂缝长度为 30.0 m,起点坐标为(35.0, 20.0),终点坐标为(65.0, 20.0),如图 4(b)所示。为了反映裂缝单元的非均匀性,令裂缝单元的弹性模量等于岩石基质的弹性模量乘以一个小于 1 的随机系数,系数的均值定义为裂缝单元刚度弱化系数,以反映裂缝整体力学性能的强弱。裂缝

闭合因素分为外因和内因。外因是地应力,内因是岩石力学属性。为了综合分析裂缝闭合行为,如下将对地应力和岩石力学参数对裂缝塑性闭合的影响进行模拟分析。

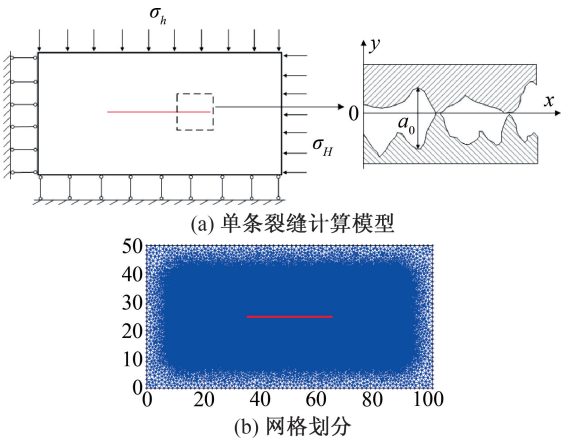

图 4 计算模型

Fig. 4 Calculation model

2.1 地应力的影响

为了揭示不同地应力条件下的岩石塑性对裂缝闭合的影响,分别设置了三种地应力差,即:Case-1:σ_h = 110 MPa/σ_H = 140 MPa;Case-2:σ_h = 120 MPa/σ_H = 140 MPa;Case-3:σ_h = 130 MPa/σ_H = 140 MPa。假定裂缝初始张开度 a_0 均值为 2.5 mm。模拟参数为:岩石基质弹性模量为 40 GPa,泊松比为 0.25;硬化参数 H' 为 4 GPa;粘聚力 C 为 25 MPa;内摩擦角 30°。裂缝单元总体刚度弱化系数为 0.542 9。

裂缝张开度的变化是重要的评价指标,本文以弹性条件下的裂缝闭合作为参考来考察塑性裂缝的闭合程度。为此定义如下塑性效应系数作为塑性裂缝闭合程度的指标,即:

$$\lambda = \Delta a_p / \Delta a_e \tag{11}$$

式中:Δa_p,Δa_e 分别为弹塑性和弹性裂缝闭合量。

所模拟的弹塑性裂缝闭合度对比如图 5 所示。从图中可看出,当保持水平地应力不变时,裂缝面上的法向应力越高,塑性效应就越强。法向应力每增大 10 MPa,塑性效应系数增加 2 %~ 3 %。当法向应力为 130 MPa 时,塑性效应系数可达 1.1。张开度沿整条裂缝变化情况如图 6 所示。从中可看出,与弹性裂缝闭合度相比,弹塑性裂缝闭合度明显增大,这说明地应力越大,塑性效应越明显。裂缝闭合程度沿裂缝长度上的分布是不均匀的,这是由于裂缝单元随机性和非均匀性引起的。

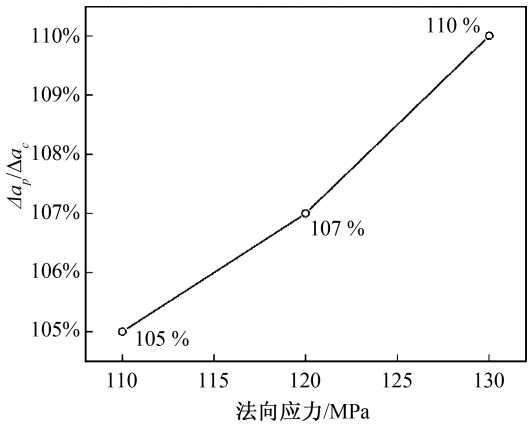

图 5 $\Delta a_p/\Delta a_e$ 与法向应力间的关系

Fig. 5 Relationship between $\Delta a_p/\Delta a_e$ and normal stress

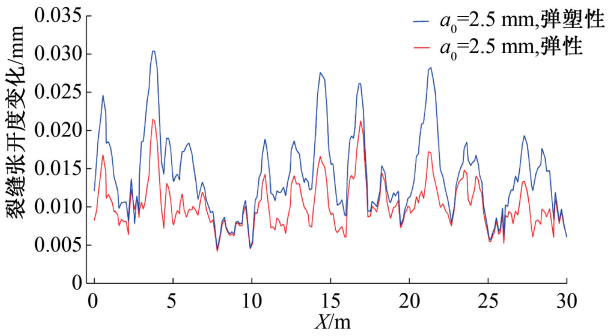

图 6 张开度沿整条裂缝的变化(Case-3)

Fig. 6 Variation of crack opening along the entire crack (Case-3)

2.2 弹性模量的影响

弹性模量是非常重要的岩石变形力学参数,为了探索其对裂缝闭合的影响,模拟 3 种弹性模量算例,即:弹性模量为 30、40 和 50 GPa。裂缝初始张开度 a_0 均值为 2.5 mm。模拟参数为:泊松比为 0.25;地应力:σ_h = 120 MPa/ σ_H = 140 MPa;裂缝单元刚度弱化系数 0.524 9;硬化参数 H' 为 4 GPa;粘聚力为 25 MPa;内摩擦角 30°。

模拟结果如图 7 所示。从图 7 中可看出,弹性模量越高,塑性效应就越弱。当弹性模量从 40 GPa 提高到 50 GPa 时,塑性效应系数从 1.18 降至 1.12。因此可看出,当弹性模量逐渐增大时,塑性效应先快速降低,最后趋于平缓。这是由于硬化参数与弹性模量的相对大小决定的。在本算例中,硬化参数保持不变,弹性模量逐渐增加,因此塑性效应逐渐相对减弱。不同模量条件下的裂缝张开度沿整条裂缝变化情况如图 8 所示。从图中可看出,与弹性裂缝闭合度相比,弹塑性裂缝闭合度明显增大。

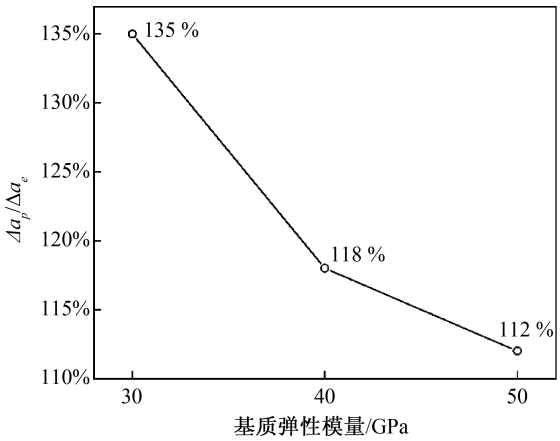

图 7 $\Delta a_p/\Delta a_e$ 与弹性模量关系

Fig. 7 Relationship between $\Delta a_p/\Delta a_e$ and Young's modulus

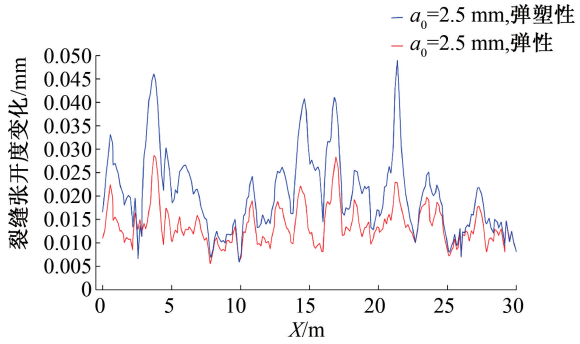

图 8 模量对裂缝闭合的影响(E=30 GPa)

Fig. 8 Influence of Young's modulus on crack closure(E=30 GPa)

2.3 粘聚力的影响

在屈服准则中,岩石粘聚力是决定屈服强度的一个重要参数。为了探究粘聚力的影响,设粘聚力分别为 20、25 和 30 MPa 三种情况。裂缝初始张开度 a_0 为 2.5 mm。模拟参数:弹性模量为 40 GPa,泊松比为 0.25;σ_h = 120 MPa/σ_H = 140 MPa;裂缝单元总体刚度弱化系数为 0.542 9;硬化参数 H 为 4 GPa;内摩擦角 30°。

模拟结果如图 9 所示。从图中可看出,粘聚力越高,塑性效应就越弱。当粘聚力从 20 MPa 提高到 30 MPa 时,塑性效应系数从 1.21 降至 1.07。

不同粘聚力条件下的裂缝张开度沿整条裂缝变化情况如图 10 所示。从图中可看出,粘聚力对裂缝闭合度影响较为明显。当粘聚力达到 30 MPa 时,弹塑性模型对应的裂缝张开度变化与弹性相差无几。这是由于当粘聚力增大时,岩石屈服强度也增大,岩石不容易塑性屈服,因此塑性效应减弱。

2.4 硬化参数的影响

为了分析硬化参数 H 对裂缝闭合的影响,分

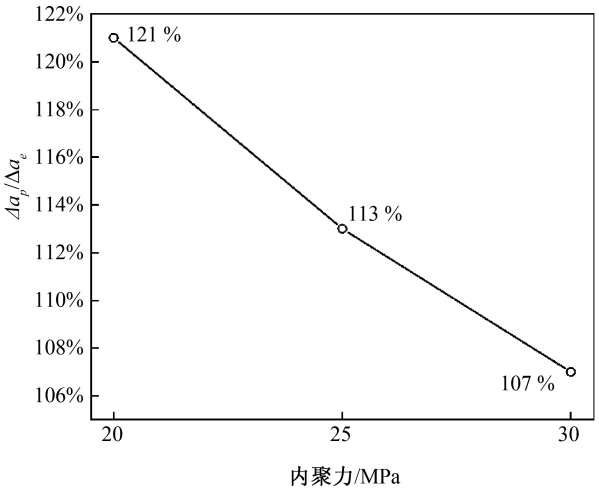

图 9 $\Delta a_p/\Delta a_e$ 与粘聚力的关系

Fig. 9 Relationship between $\Delta a_p/\Delta a_e$ and cohesion force

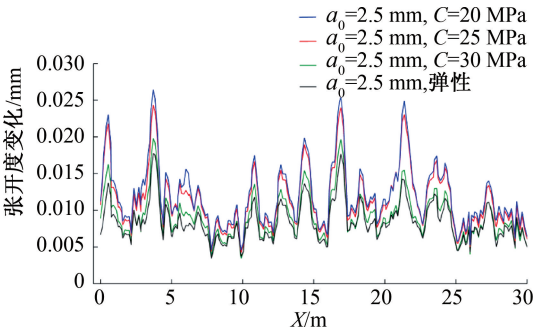

图 10 粘聚力对裂缝闭合的影响

Fig. 10 Impact of cohesion on crack closure

别设定硬化参数 H=3、4、5 GPa 三种情况。裂缝初始张开度 a_0 为 2.5 mm。模拟参数:弹性模量为 40 GPa,泊松比为 0.25;σ_h = 120 MPa/σ_H = 140 MPa;裂缝单元总体刚度弱化系数为 0.542 9;粘聚力为 25 MPa;内摩擦角 30°。

模拟结果如图 11 所示。从图 11 中可看出,硬化参数越高,塑性效应就越弱。当硬化参数从 2 GPa 增加到 3 GPa 时,塑性效应系数快速降低。当硬化参数从 3 GPa 提高到 4 GPa 时,塑性效应系数变化较小。这是由于塑性效应和硬化参数与弹性模量的相对大小有关。在本算例中,弹性模量保持不变,当硬化参数逐渐增加时,硬化参数与弹性模量的比值逐渐增大。同时,硬化参数也决定了后继屈服应力的大小,硬化参数越大,后继屈服应力越大,越不容易发生后继屈服,因此塑性效应系数越小。

不同硬化参数条件下的裂缝张开度沿整条裂缝变化如图 12 所示。从图中可看出,硬化参数对裂缝闭合度的影响较为明显。当硬化参数达到

5 GPa 时,弹塑性模型计算的裂缝张开度与弹性的相差不大。

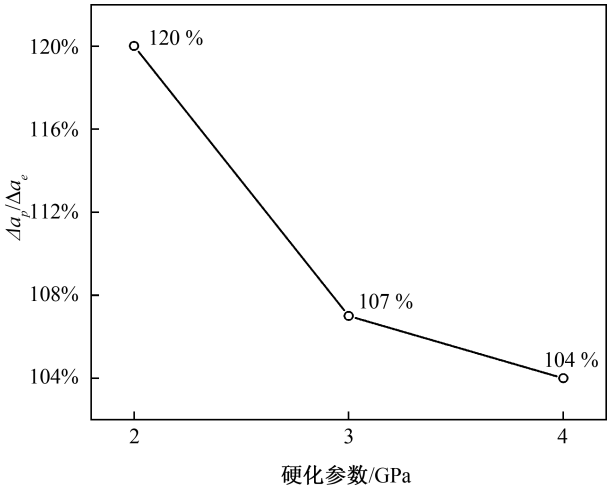

图 11 $\Delta a_p/\Delta a_e$ 与硬化参数关系

Fig. 11 Relationship between $\Delta a_p/\Delta a_e$ and hardening coefficient

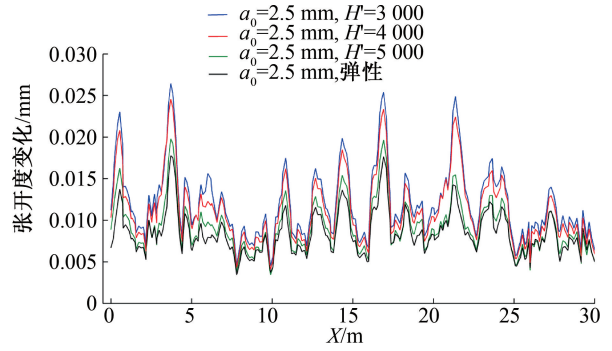

图 12 塑性硬化参数对裂缝闭合的影响

Fig. 12 Effect of plastic hardening parameter on crack closure

3 结论

在超深储层高温高地应力作用下,岩石具有很强的塑性特征,这对裂缝闭合有着重要的影响。本文在 Herz 接触模型基础上,基于 Drucker-Prager 屈服准则,建立了弹塑性裂缝闭合模型。分析了不同地应力、弹性模量、粘聚力和硬化参数条件下的岩石塑性对裂缝闭合行为的影响,得出如下主要结论:

1)地应力对裂缝闭合的影响主要体现在裂缝闭合压力上,闭合压力越大,塑性效应越明显。

2)弹性模量、硬化参数和粘聚力是影响裂缝闭合塑性效应的关键因素。随着弹性模量、硬化参数和粘聚力的增加,塑性效应会显著减少。

3)粘聚力的大小决定了初始屈服强度,粘聚力越大,初始屈服应力越大,塑性效应越不容易发生。弹性模量和硬化参数的相对大小主要影响后继屈服面的大小,当硬化参数与弹性模量的比值越大,后继屈服应力也就越大,材料应力状态越不容易达到后继屈服面,因此塑性效应越弱。

通过本文研究,在超深储层中,岩石塑性对裂缝闭合的影响不容忽视。在使用本模型对超深储层水力压裂过程中裂缝导流能力进行估计时,应重点考虑硬化参数和粘聚力的大小。

参考文献:

[1] 李宗杰,杨子川,李海英,等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J]. 石油物探,2020,59(2):283-294.

[2] 周延军,耿应春,王贵宾,等. 深部地层岩石力学性质测试与分析研究[J]. 岩土力学,2011,32(6):1625-1630.

[3] 席道瑛,谢 端,易良坤,等. 温度对岩石模量和波速的影响[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(S):802-807.

[4] 许锡昌,刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. 岩土工程学报,2000(3):332-335.

[5] ZHANG P, MISHRA B, HEASLEY K A. Experimental Investigation on the Influence of High Pressure and High Temperature on the Mechanical Properties of Deep Reservoir Rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015,48(6):2197-2211.

[6] ZHAO Y S, WAN Z J, FENG Z J, et al. Evolution of Mechanical Properties of Granite at High Temperature and High Pressure[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources,2017,3(2):199-210.

[7] LIU S, XU J. An Experimental Study on the Physico-mechanical Properties of Two Post-high-temperature rocks [J]. Engineering Geology,2015,185:63-70.

[8] 侯公羽,牛晓松. 基于 Levy-Mises 本构关系及 Hoek-Brown 屈服准则的轴对称圆巷理想弹塑性解[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):765-777.

[9] 杨 强,杨晓君,陈 新. 基于 D-P 准则的理想弹塑性本构关系积分研究[J]. 工程力学,2005,22(4):15-19.

[10] 王 凯,刁心宏,赖建英,等. FLAC3D 应变软化与摩尔库伦模型工程应用对比[J]. 中国科技论文,2015,10(1):55-63.

[11] THIAGARAJAN G, HUANG Y, HSIA K J. Fracture Simulation Using an Elasto-Viscoplastic Virtual Internal Bond Model with Finite Elements [J]. Journal of Applied Mechanics,2004,71:796-804.

[12] GAO H, KLEIN P. Numerical Simulation of Crack Growth in an Isotropic Solid with Randomized Internal Cohesive Bonds[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1998,46(2):187-218.

(下转第 55 页)

Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017,216:12-43.
[17] 李剑光,王永岩. 含水平弱夹层岩体界面应力及破坏形式[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2015,34(6):710-715.
[18] 赵宏刚,张东明,蒋长宝,等. 考虑软弱夹层厚度的岩体力学响应及破坏特征研究[J]. 岩土力学,2022,43(4):969-980+1030.
[19] 汤友生,姚海林,廖 阳,等. 软弱夹层倾角对煤系砂岩物理力学特性的影响研究[J]. 矿业研究与开发,2018,38(8):51-55.
[20] 丁恩理,刘 越,吴继敏,等. 软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S1):39-46.
[21] 邓华锋,张吟钗,李建林,等. 含水率对层状砂岩劈裂抗拉强度影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(11):2778-2787.
[22] 徐庆强,高起林,吴继敏,等. 含薄层硬岩的软弱夹层力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S2):548-554.
[23] 王安明,杨春和,黄 诚,等. 层状盐岩力学和变形特性数值试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(7):2173-2178.
[24] 杨春和,李银平,陈 锋. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京:科学出版社,2009.
[25] 李剑光. 含倾斜软弱夹层复合岩体强度及蠕变特性研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2015.

(责任编辑　王利君)

(上接第 45 页)

[13] 刘子寒. 岩石弹塑性虚内键本构模型及其在深部储层生产模拟中的应用[D]. 上海:上海交通大学,2022.
[14] WEI X, ZHAO B, JI C, et al. Elastoplastic Augmented Virtual Internal Bond Modeling for Rock: A Fracture-plasticity Combined Constitutive Model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2023,47(8):1331-1348.
[15] ZHANG Z, GAO H. Simulating Fracture Propagation in Rock and Concrete by an Augmented Virtual Internal Bond Method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2012,36(4):459-482.
[16] 牟建业,张士诚. 酸压裂缝导流能力影响因素分析[J]. 油气地质与采收率,2011,18:69-71.
[17] 白 翔. 基于刻蚀形态数字化表征的酸蚀裂缝导流能力研究[D]. 成都:西南石油大学,2015.
[18] 龚 明. 计算酸压裂缝导流能力的新模型[J]. 天然气工业,1999,19(3):68-72.
[19] 周创兵,叶自桐,何炬林,等. 岩石节理张开度的概率模型与随机模拟[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(3):267-272.
[20] 谢和平,李存宝,高明忠,等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(2):217-232.

(责任编辑　王利君)