

地应力对油页岩地层劈裂注浆裂隙扩展的影响

朱江^{1,2,3}, 张楠^{1,2,3}, 陈晨^{1,2,3}, 张晗^{1,2,3}, 潘栋彬^{1,2,3}, 王亚斐^{1,2,3}, 靳成才^{1,2,3}, 刘书源^{1,2,3}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合工程实验室, 吉林 长春 130026; 3. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:地应力的差异性对劈裂注浆的裂隙扩展有着重要的影响。针对油页岩原位裂解区止水, 本文提出定向射孔与劈裂注浆相结合的新方法, 引导裂隙扩展。根据油页岩参数, 利用 RFPA 软件, 分析有无射孔对裂隙扩展的影响, 并进一步分析地应力差异对有射孔时裂隙扩展的影响。结果表明, 与无射孔注浆相比, 有射孔注浆可定向劈裂并减小注浆压力; 当 x 方向应力大于 y 方向应力时, 射孔之间产生的大量裂隙将射孔连通形成帷幕; 当 x 方向应力小于 y 方向应力时, 随着应力差异的逐渐变大, 裂隙扩展逐渐从 x 方向向 y 方向偏转, 直到应力差异成为影响裂隙扩展的主要因素, 射孔之间才未形成裂隙且不能连通。此研究成果可为油页岩原位裂解区止水工程提供借鉴。

关键词:地应力; 油页岩地层; 裂隙扩展; 射孔; 劈裂注浆

中图分类号: TE132.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2018)10-0032-08

Influence of Ground Stress on Fracture Propagation of Split Grouting in Oil Shale Formation/ZHU Jiang^{1,2,3}, ZHANG Nan^{1,2,3}, CHEN Chen^{1,2,3}, ZHANG Han^{1,2,3}, PAN Dong-bin^{1,2,3}, WANG Ya-fei^{1,2,3}, JIN Cheng-cai^{1,2,3}, LIU Shu-yuan^{1,2,3} (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of In-situ Conversion, Drilling and Exploitation Technology for Oil Shale, Changchun Jilin 130026, China; 3. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: The difference in ground stress has an important influence on the fracture propagation of split grouting. Aiming at the water stoppage in the oil shale in-situ retorting zone, this paper proposes a new method combining directional perforation and split grouting to guide fracture propagation. According to the oil shale parameters, RFPA was used to analyze the influence of perforation on fracture propagation, and further analyze the influence of ground stress difference on fracture propagation with perforation. The results show that compared with non-perforated grouting, perforated grouting can direct splitting and reduce grouting pressure; When the stress in the x direction is greater than the stress in the y direction, a large number of fractures generated between the perforations connect the perforations to form a curtain; When the stress in the x direction is less than the stress in the y direction, as the stress difference gradually increases, the fracture propagation gradually deflects from the x direction to the y direction, until the stress difference becomes the main factor affecting fracture propagation, no fractures are formed between the perforations and the perforations cannot be connected. This study can provide a reference for the water stop project in the oil shale in-situ retorting zone.

Key words: ground stress; oil shale formation; fracture propagation; perforation; splitting grouting

0 引言

近年来, 油页岩作为石油的补充能源备受关注。油页岩是一种固体可燃有机矿物, 作为一种重要的非常规能源, 油页岩在世界范围内分布广泛, 而且储量巨大^[1-8]。油页岩的开采方法主要有两种, 第一种开采方法是露天、地下巷道开采, 再进行地面干馏

分离, 此方法对环境污染较大。油页岩的另一种开采方法是地下原位加热裂解开采, 原位裂解的原油和天然气提取到地表, 整个反应在地下进行, 大大减轻了油页岩开采对环境的污染^[9]。目前, 油页岩原位加热裂解开采方法已经成为主要的研究方向^[10]。

油页岩在原位加热过程中将产生很多化学物

收稿日期: 2018-07-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“高压低温水射流作用下海底天然气水合物储层破岩过程与机理研究”(编号: 41672361); 省校共建项目, 新能源专项“油页岩原位转化工程共性关键技术研究”(编号: SXGJSF2017-5); 吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(编号: 20160204011SF)

作者简介: 朱江, 男, 汉族, 1991 年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 吉林省长春市西民主大街 938 号, 953461598@qq.com。

通信作者: 陈晨, 男, 汉族, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事非常规能源开发技术、极地施工技术、岩土工程施工技术的研究及教学工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, chenchen@jlu.edu.cn。

质,包括有机挥发物、半挥发物质和重金属^[11-14]。在地下水丰富的地层中,地下水容易进入压裂后的原位开采区,地下水的进入不仅影响了原位裂解的加热效率,也容易将产生的油气带走。同时,裂解的油气也很容易污染周边的地下水及土壤。为了避免以上问题,国内外大量学者对油页岩原位裂解区的止水封闭方法进行了研究。美国的壳牌公司在开采区周边布置冷冻井,利用循环冷冻液,将冷冻井周边的地下水及周围介质一起冷冻形成冷冻墙^[15-16];陈晨等采用高压氮气从注入井注入,开采井流出,其间形成高压区,使高压氮气与地下水形成压力平衡,阻止地下水进入开采区^[17];吕士东等利用水泥浆液对开采区周边进行渗透注浆,浆液凝固后在迎水方向阻止地下水进入油页岩原位裂解开采区^[18]。油页岩原位裂解开采周期长^[19],注浆封闭无论是在能量消耗还是止水稳定性上具有非常大的优势。

注浆方法已经在许多工程领域得到应用,在油页岩地层少有研究。油页岩是一种致密的沉积岩,用渗透注浆的办法封闭开采区周边,浆液的扩散范围小,所需注浆孔多,钻孔及注浆经济费用较高。而且,油页岩地层存在许多天然裂缝和构造裂缝,若注浆孔不能与已有裂隙相交,浆液通过渗透形式很难渗入微小裂缝。劈裂注浆方法利用较高的注浆压力产生裂缝,以此连通天然裂隙及人工压裂裂隙,浆液填充并凝结在裂缝中可以减少渗水通道,而且,劈裂注浆较渗透注浆扩散距离远,可以减少钻孔数量,节省工程造价和缩短工期。地层中裂缝的扩展具有不确定性,大量学者对定向劈裂进行了研究,石明生等利用定向劈裂对土石坝进行止水治理^[20];吕奇峰在隧洞注浆止水中,对注浆孔与诱导孔的间距进行了研究^[21];黄明利等针对隧洞内水平超前注浆,利用理论和模拟的方法得出了诱导劈裂注浆中诱导孔及侧压力系数满足的条件^[22]。以上研究中诱导孔与注浆孔的诱导间距小,工程量大,利用射孔与注浆相结合可增大浆液扩散范围,减少注浆孔数量,针对油页岩地层利用射孔引导裂隙扩展的双孔劈裂注浆可增大孔间距并形成止水帷幕,然而,对此还未有研究。

基于此,本文采用 RFPA-2D 软件建立数值模型,根据油页岩地层物理力学参数,对比分析带有射孔注浆和不带射孔注浆的裂隙起裂位置及裂隙扩展方向的不同,并对射孔间距为 2 m 时,模拟分析应力差异对带射孔劈裂注浆裂隙扩展的影响规律。

1 劈裂注浆概念及数学模型

1.1 劈裂注浆概念

劈裂注浆是在灌浆钻孔中施加浆液,当液压超过渗透和压密灌浆的极限力时,使被灌注岩土体发生劈裂现象产生新的灌浆裂缝或者使原有裂缝张开并沿着最小阻力方向延伸,灌载体最终凝固在裂缝中,起到填充和加固的作用,如图 1 所示。对于不与注浆孔相连的裂隙及孔隙,以浆液为压裂液劈裂岩层形成裂隙,浆液与裂隙同时流动扩展,可将远处裂隙及孔隙连通并填充。劈裂注浆对被灌载体是破坏性的,因为要先进行劈裂为浆液流动提供通道,同时,劈裂注浆又是建设性的,浆液在裂缝中流动最终凝结,起到防渗堵漏的作用。

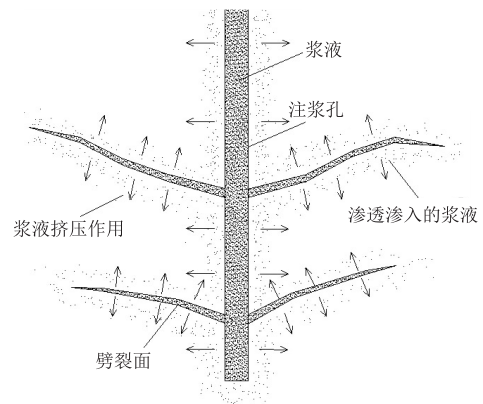


图 1 劈裂注浆示意图

1.2 渗流-应力-损伤数学模型^[23-25]

地层中的岩石在劈裂过程中,岩石内部的应力状态和渗流特性会持续相互影响,最终导致材料的损伤破坏。在注浆压力的作用下,劈裂裂缝的渗流行为和已存在裂缝的渗流行为是不同的。所以,岩体在荷载作用下劈裂损伤时,岩体的渗透率时刻发生变化。所以在劈裂裂缝的扩展中要考虑裂缝渗流-应力-损伤耦合的效应。

(1) 渗流-应力耦合方程。

基于 Biot 经典渗流耦合基本方程建立渗流-应力耦合方程:

$$K(\sigma, p) = \xi K_0 e^{-\beta[(\sigma_{ii}/3) - \alpha p]} \quad (1)$$

式中: K 、 K_0 ——岩体渗透系数, m/s ; σ_{ii} ——正应力, MPa ; p ——劈裂注浆压力, MPa ; ξ ——渗透相关系数; β ——渗流-应力耦合系数; α ——裂缝液压系数。

(2) 渗流-损伤耦合方程。

当模型中的单元所受的应力或者应变达到某个

设定的损伤数值时,单元开始损伤,损伤单元的弹性模量为:

$$E = (1 - \lambda)E_0 \quad (2)$$

当单元的剪应力达到岩体的抗剪破坏临界强度时,损伤变量为:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \epsilon_{c\lambda} < \epsilon_0 \\ 1 - f_{cr}/(E_0 \epsilon_{c\lambda}) & \epsilon_{c\lambda} \geq \epsilon_0 \end{cases} \quad (3)$$

岩体单元渗透系数为:

$$K = \begin{cases} K_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & \lambda = 0 \\ \xi K_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & \lambda > 0 \end{cases} \quad (4)$$

当单元达到抗拉强度临界值时:

$$\sigma_3 < -f_t \quad (5)$$

损伤系数 λ 为:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \epsilon_{c\lambda} \leq \epsilon_0 \\ 1 - f_{cr}/(E_0 \epsilon_{c\lambda}) & \epsilon_0 < \epsilon_{c\lambda} < \epsilon_{tu} \\ 1 & \epsilon_{c\lambda} \geq \epsilon_{tu} \end{cases} \quad (6)$$

单元渗透系数为:

$$K = \begin{cases} K_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & \lambda = 0 \\ \xi K_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & 0 < \lambda < 1 \\ \xi' K_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & \lambda = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: E ——损伤单元弹性模量,MPa; λ ——岩体损伤系数; E_0 ——无损伤单元弹性模量,MPa; f_{cr} ——岩体残余强度,MPa; f_t ——抗拉强度损伤阈值,MPa; K 、 K_0 ——岩体渗透系数,m/s; σ_i ——正应力,MPa; p ——劈裂注浆压力,MPa; ξ ——渗透相关系数; β ——渗流—应力耦合系数; α ——裂缝液压力系数; ξ' ——渗透突变系数; ϵ_0 ——原始形变; $\epsilon_{c\lambda}$ ——损伤剪切变形; ϵ_{tu} ——应变极限值。

2 数值模拟

本文采用 Realistic Failure Process Analysis—2D Flow(RFPA)软件对油页岩地层进行劈裂注浆数值模拟,RFPA 软件是基于 Biot 固结理论和修正的 Terzaghi 有效应力原理,同时在劈裂过程中考虑了渗透率变化的影响,开发出的二维的岩石失稳过程渗流—应力—损伤耦合分析程序,后处理功能有声发射图、孔隙水压力图、最大主应力云图等^[26]。可以对低渗透性和非均匀性的岩石劈裂过程中裂纹产生、扩展、失稳过程进行分析。

本文研究的物理模型见图 2,模型长 6 m、宽 3 m,注浆孔半径为 0.06 m,裸孔间距为 3.2 m,射孔长度 0.6 m,射孔间距为 2 m,本文以 $k = (\sigma_x - \sigma_y)/$

σ_x 为水平地应力变化的指标评价不同应力水平对裂隙扩展影响。应力组合见表 1。

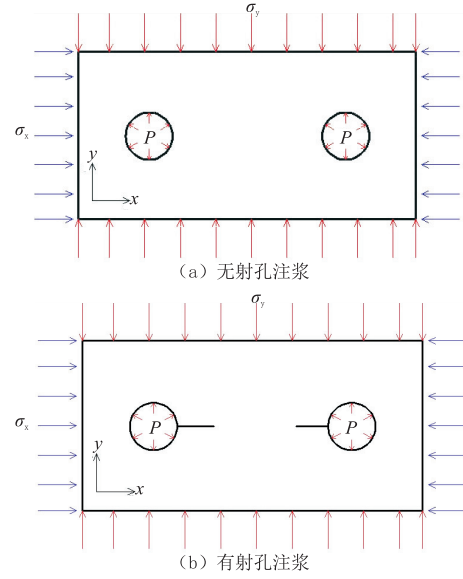


图 2 注浆模型

表 1 不同应力组合参数

编号	σ_x /MPa	σ_y /MPa	k	编号	σ_x /MPa	σ_y /MPa	k
1	6	10	-0.67	7	10	8	0.2
2	7	10	-0.43	8	10	7	0.3
3	8	10	-0.25	9	10	6	0.4
4	9	10	-0.11	10	6	6	0
5	10	10	0	11	4	4	0
6	10	9	0.1	12	2	2	0

本文研究的材料为油页岩,基本材料参数为:均质度 1 m,弹性模量均值 $E = 15$ GPa,抗压强度均值 $\sigma = 30$ MPa,摩擦角 $\varphi = 30^\circ$,压裂比 C/T (材料抗压强度与抗拉强度比值)14.2,泊松比 0.23,渗透系数 0.00001 m/d。渗流压力加载初始值设为对应的浆液液柱压力,单位 m,逐级加载直至岩石模型破坏失效,模型中的边界渗流压力取值为 0 MPa。劈裂浆液的密度取值 1510 kg/m³。

3 无射孔注浆与有射孔注浆的裂缝起裂及扩展对比分析

为研究射孔对裂缝起裂及扩展的影响,排除 σ_x 、 σ_y 差异的影响,取 $k = 0$ 时,对模拟试验 5、10、11、12 进行数值模拟。4 组试验中裂隙扩展相似,以模拟试验 5 为例对无射孔注浆和有射孔注浆的裂缝起裂及扩展进行对比分析,模拟试验 5 的数值模拟结果如图 3、图 4、图 5 所示。

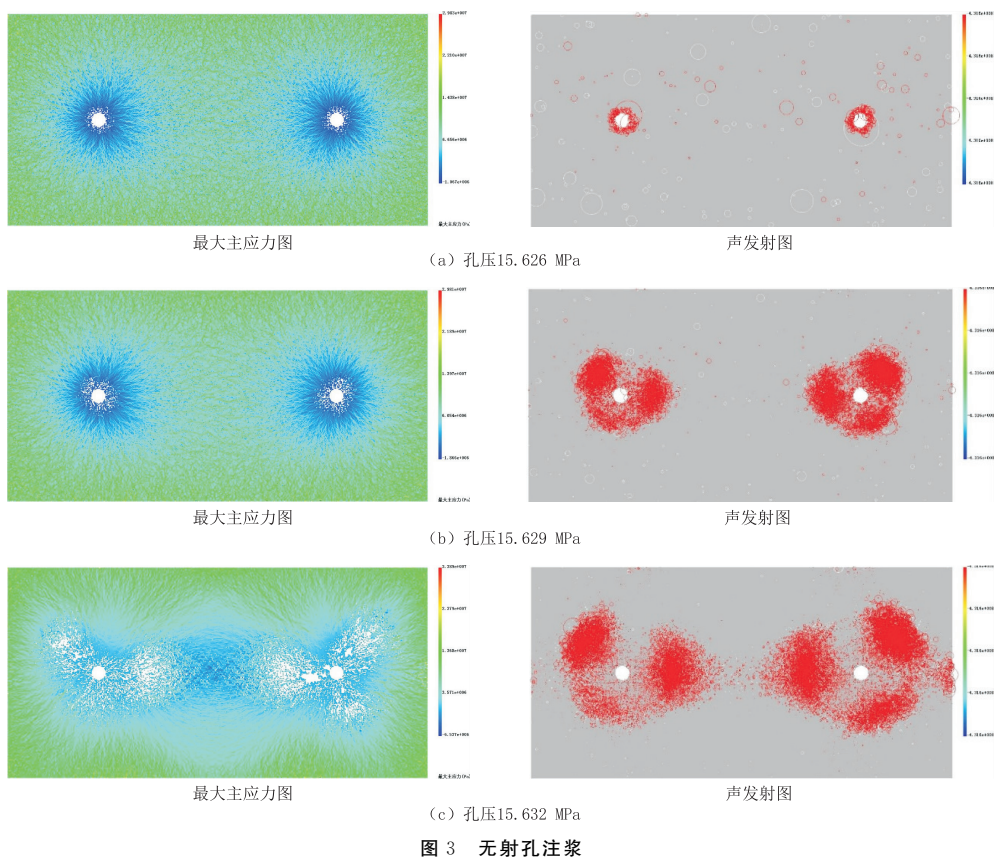


图 3 无射孔注浆

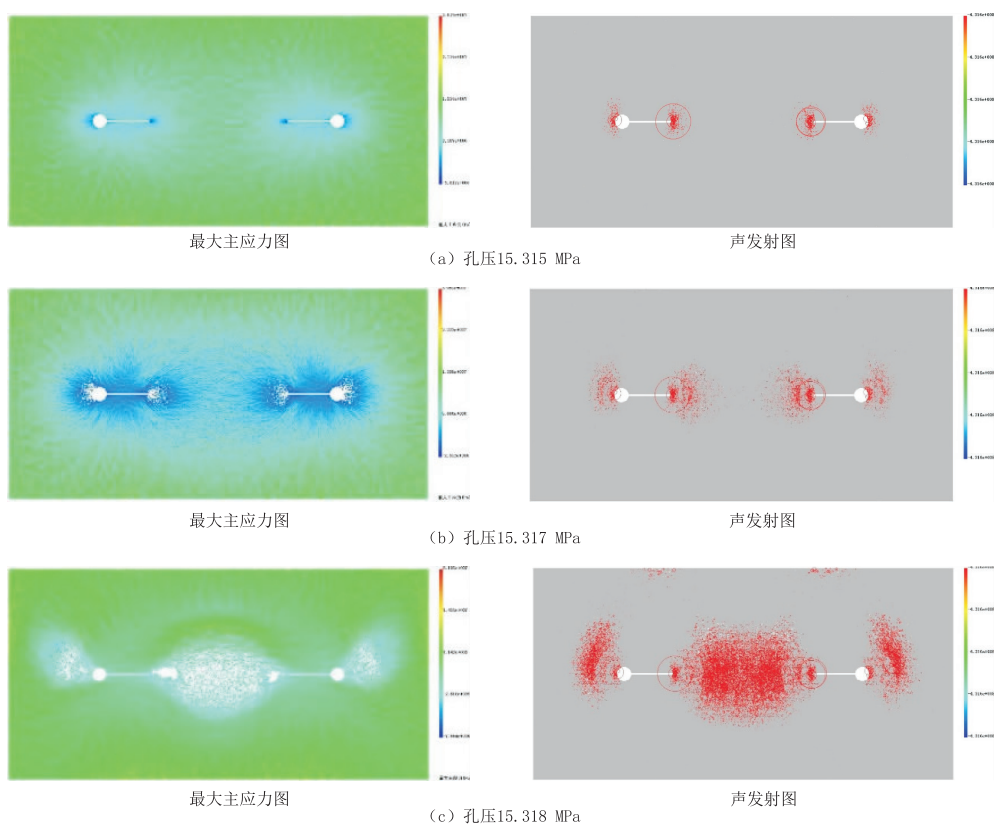


图 4 有射孔注浆

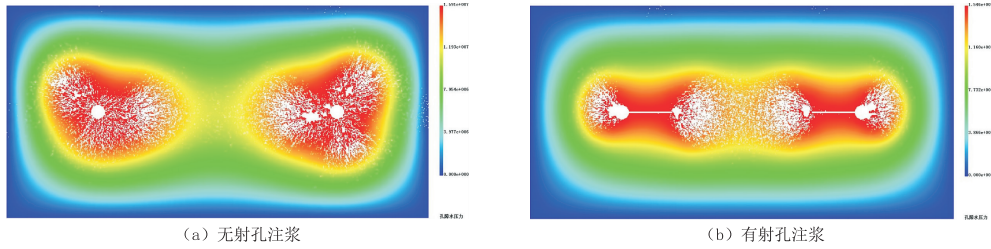


图5 孔隙压力云图

长期研究表明,材料在荷载的作用下会发生变形及破坏,会发出一系列声脉冲,这种声信号是材料内部相对位移、裂隙发育和力的释放等过程释放出来的,这就是声发射,声发射图中的圆圈大小代表能量的大小,圆圈越大能量越大,红色圆圈代表拉伸破坏,白色圆圈代表剪切破坏。声发射可以作为本文裂缝起裂位置及裂隙产生的依据。

图3中声发射图表明,裂隙在注浆孔四周起裂,主要为拉伸破坏,局部存在剪切破坏,最终会向岩层薄弱的位置延伸破坏。而图4的声发射图表明,裂隙的起裂位置主要集中在射孔的尖端以及左注浆孔左端、右注浆孔右端,起裂的位置及裂隙的扩展主要集中在射孔之间,近似对称分布,而无射孔注浆的最终裂缝分布没有一定的方向性,在注浆实际工程中不易控制注浆方向。有射孔的劈裂注浆与裸孔注浆相比,射孔起到定向劈裂的目的,并且减小注浆孔间的劈裂距离。从图5可知,无射孔注浆的最大液柱压力值为15.91 MPa,带射孔的最大液柱压力值为15.46 MPa,带射孔注浆所消耗的能量少,且最终能够将两个注浆孔相连,形成有效的防水帷幕。因此,带射孔注浆具有定向劈裂并减小能量消耗的作用。

4 k 值变化对有射孔的双孔注浆的影响

实际地层中 σ_x 和 σ_y 具有差异性,这种差异会对裂隙的扩展有很大的影响,本文以 k 值作为地应力变化的指标,对有射孔的注浆孔进行裂隙扩展的模拟分析。

4.1 $k=0.1、0.2、0.3、0.4$ 时,地应力对有射孔的双孔注浆的影响

利用数值模拟软件RFA分别对表1中的模拟试验6、7、8、9四组应力组合进行数值模拟计算。以模拟试验9为例,其最大主应力及声发射模拟结果如图6所示。四组数值模拟的孔隙压力云图见图7。

图6表明起裂的位置首先在左射孔的尖端和右

射孔末端的 σ_x 方向上开始。由图6(a)的声发射图可见,在射孔的尖端红色能量圈小而密集,注浆孔附近的区域也存在一些红色和白色的能量圈,其中红色圆圈为拉伸破坏能量释放,白色圆圈为剪切破坏能量释放,声发射图表明在破坏初始阶段主要以射孔尖端拉伸破坏及局部区域的剪切破坏为主。随着注浆孔压力持续增大,射孔尖端的应力集中越来越明显,拉伸破坏能量释放不断增多,破坏范围不断增大,射孔尖端附近形成拉伸破坏区,与此同时注浆孔孔壁附近也形成了拉伸破坏区,图6的(b)和(c)声发射图相对应的最大主应力图也可表明在射孔尖端及注浆孔附近的主拉应力值及拉应力区越来越大。随着注浆压力持续增加,注浆孔和射孔周边的主拉应力区不断扩大,最终相连,在两个射孔之间形成了类似梭形的最大主拉应力区,与最大主应力图相对应的声发射图表明在射孔之间能量释放越来越多,且非常密集,此处产生大量的裂缝,最终导致射孔之间的岩层劈裂连通。

图7表明当 $k=0.1、0.2、0.3、0.4$ 时,最大液柱压力值分别为13.32、11.84、8.44、7.55 MPa。最大液柱压力随着 σ_y 的减小而减小。模拟试验6、7、8同模拟试验9的破坏过程相似,在射孔存在的条件下,射孔扩大了最大主拉应力的范围,随着注浆压力的不断增大,两个不断扩大的主拉应力区更容易连通,最终在边界应力及射孔诱导下可实现注浆孔劈裂连通,而且随着 k 值的增加,射孔之间的裂隙比较集中,裂隙的扩展具有更好的方向性。

4.2 $k=-0.67、-0.43、-0.25、-0.11$ 时,地应力对有射孔的双孔注浆的影响

对模拟试验1、2、3、4四组应力组合进行数值模拟,模拟结果见图8。

图8中的孔隙压力云图表明1、2、3、4四组应力组合的起裂压力分别为7.55、8.88、11.84、13.32 MPa,最大液柱压力随着 k 值的增加而增加。当 k

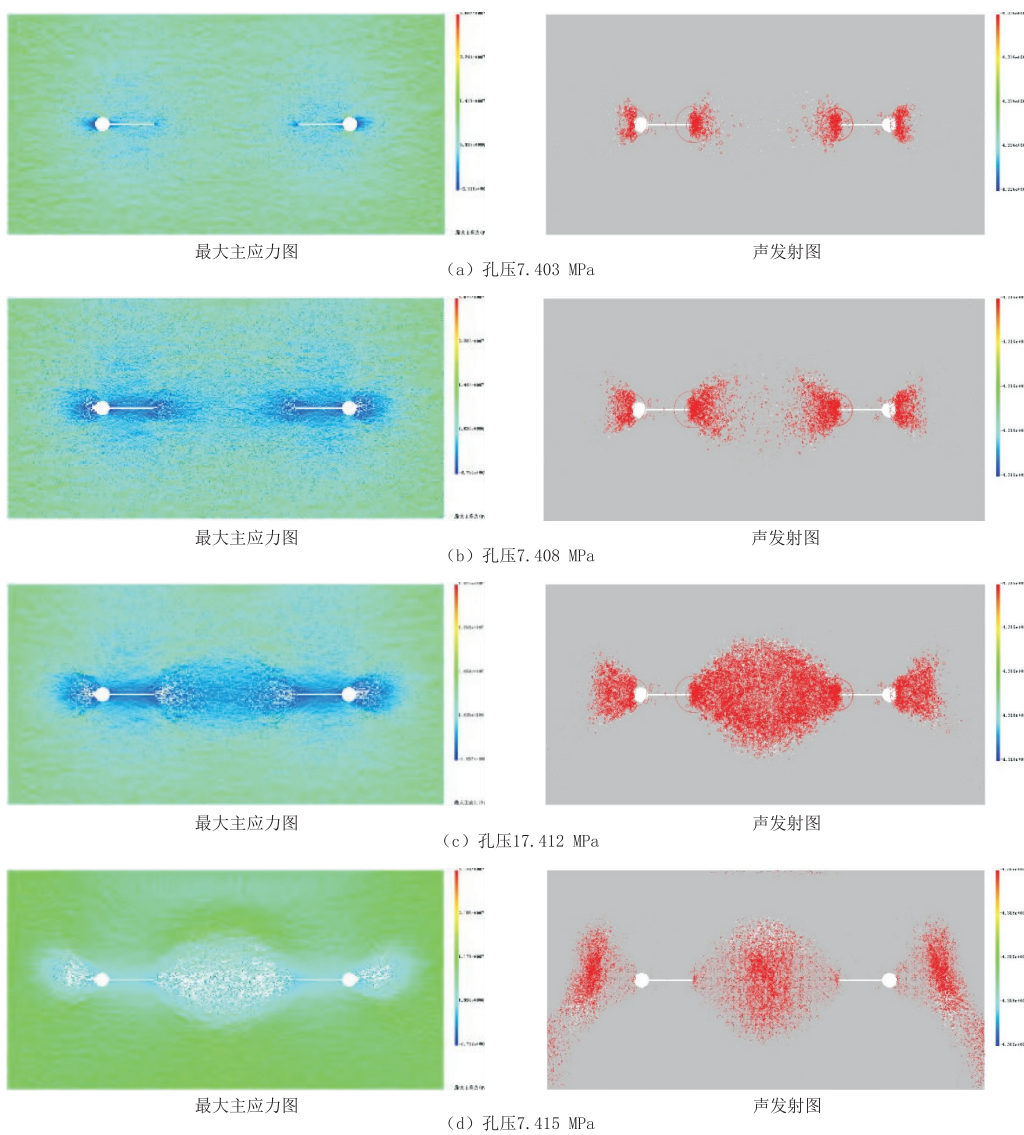


图 6 $k=0.4$ 时最大主应力图(左)与声发射图(右)

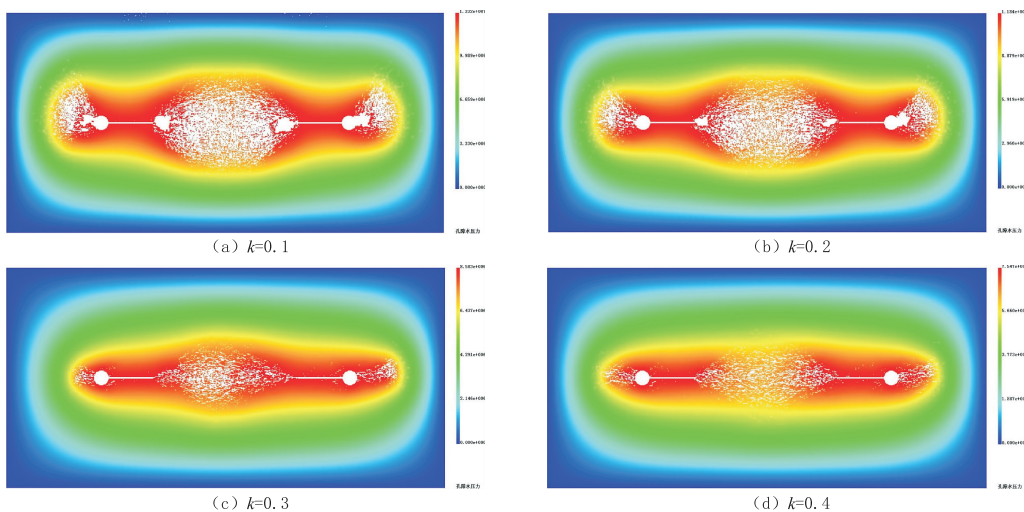


图 7 孔隙压力云图

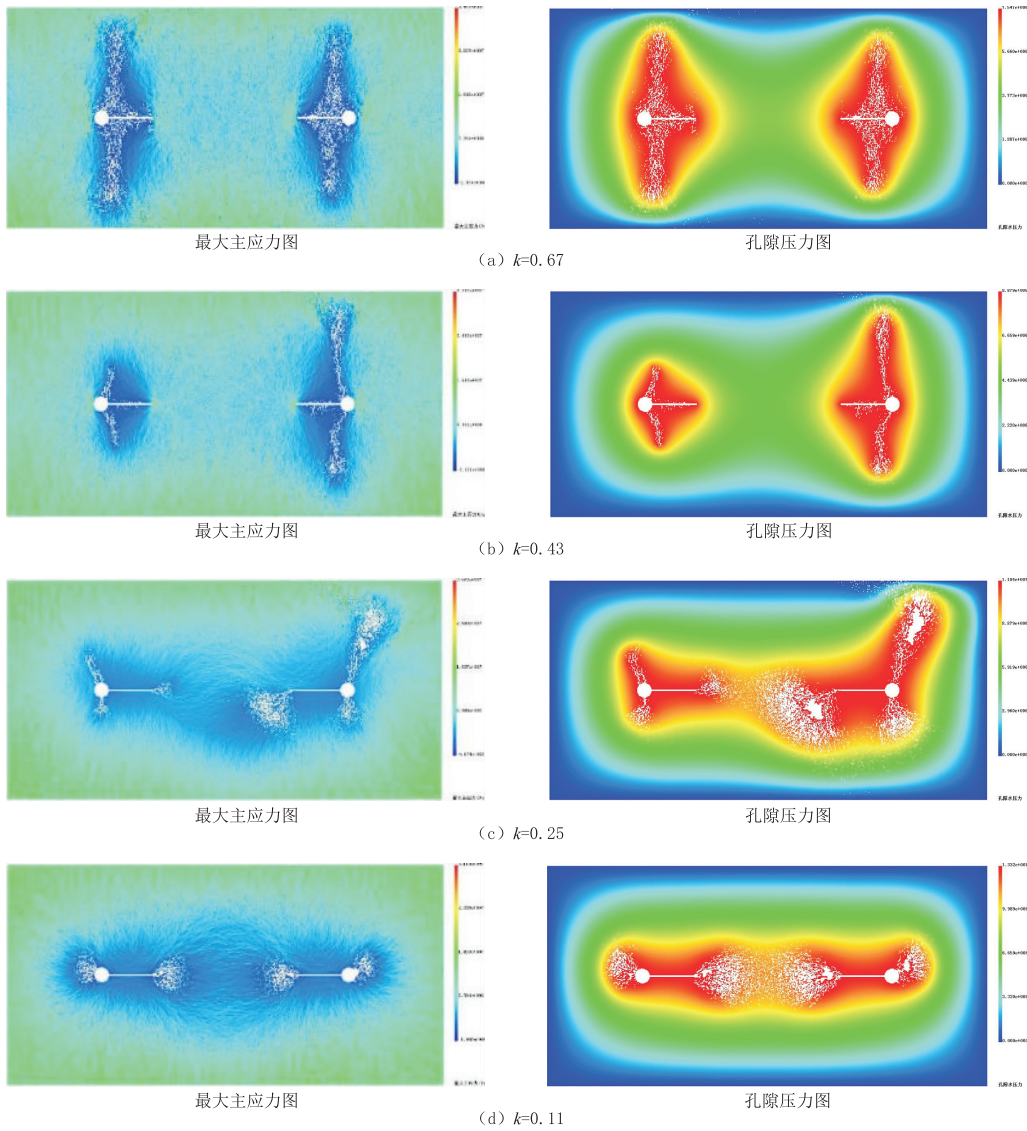


图8 不同 k 值的最大主应力图与孔隙压力图

$= -0.25$ 、 -0.11 时,随着 k 值的减小,裂缝的扩展方向会发生改变,注浆孔和射孔附近产生的裂缝会向最小阻力方向扩展,即 σ_y 的方向。但是,因为边界应力差较小,两射孔附近形成的主拉应力区仍会不断增大并相连,最终在两射孔之间形成主拉应力区,受拉伸破坏形成的大量的裂缝也会连通两个注浆孔,结果如图8(c)最大主应力图,(d)最大主应力图所示。 $k = -0.25$ 、 -0.11 时,与4.1中 $k > 0$ 的几种情况相比,裂隙的扩展会受到边界应力的影响,其扩展方向较为不集中,但是仍可连通相距2 m的射孔。

如图8(a)最大主应力图,(b)最大主应力图所示,当 $k < -0.25$ 时,较大边界应力差成为影响裂

缝扩展主要的因素,注浆孔及射孔附近产生的裂缝会沿最小阻力方向扩展,即 σ_y 的方向,注浆孔的压力虽然持续增加,但是注浆孔以及射孔周边的主拉应力区未能相互连接,不能为岩层破裂提供应力条件。此时,间距2 m的射孔之间并未形成有效的连通区域。

5 结论

本文研究了地应力差异对有射孔的双孔劈裂注浆裂缝扩展的影响,研究结果可为油页岩原位裂解区止水封闭实际工程提供一定的借鉴。结论如下:

(1)有射孔注浆与无射孔注浆相比,有射孔注浆可以增大浆液的扩散距离,同时具有定向劈裂并减

小注浆压力的作用。

(2)当 x 方向应力大于 y 方向应力时,裂缝沿着 x 方向扩展,射孔之间的岩层在主拉应力的作用下产生大量的劈裂裂缝,将距离 2 m 的射孔连通形成帷幕。

(3)当 x 方向应力小于 y 方向应力时,随着地应力差异的不断变大,裂缝扩展逐渐从 x 方向向 y 方向偏转,直到应力差异成为影响裂缝扩展的主要因素,射孔之间才不能形成劈裂裂缝且不能连通。

参考文献:

- [1] 陈晨,孙友宏.油页岩开采模式[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):26-29.
- [2] Chen C, Wang W, Sun Y, et al. Influence of the Heat Transfer Efficiency of Oil Shale In Situ Fragmentation[M]// Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia. Springer Berlin Heidelberg, 2013:577-583.
- [3] 高帅.油页岩水平井水力压裂裂缝起裂与延伸机理研究[D].吉林长春:吉林大学,2017.
- [4] 严轩辰.农安和桦甸油页岩力学性能及其水力压裂与破碎关键参数研究[D].吉林长春:吉林大学,2012.
- [5] 王维.油页岩水力压裂数值模拟及实验研究[D].吉林长春:吉林大学,2014.
- [6] Qian J, Wang J, Li S. Oil shale development in China[J]. Oil Shale, 2003,20(3):356-359.
- [7] 刘招君,柳蓉.中国油页岩特征及开发利用前景分析[J].地学前缘,2005,12(3):315-323.
- [8] 白文翔,孙友宏,周科,等.油页岩原位裂解用注热管柱数值传热模拟与试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):1-5.
- [9] Zhao G J, Chen C, Qian F. Application Prospects in China of Oil Shale In Situ Mining Method and an Improved Method[J]. Applied Mechanics & Materials,2014,535:602-605.
- [10] Geng Y, Liang W, Liu J, et al. Evolution of Pore and Fracture Structure of Oil Shale under High Temperature and High Pressure[J]. Energy & Fuels,2017,31(10).
- [11] 陈殿义.国外油页岩的地下开采及环境恢复[J].吉林地质,2005,24(3):58-60.
- [12] 杨萌尧.油页岩不同开发方式生态环境影响评价研究[D].吉林长春:吉林大学,2012.
- [13] 邱淑伟.油页岩原位开采对地下水化学特征的影响实验研究[D].吉林长春:吉林大学,2016.
- [14] 王德龙.油页岩原位热解的地表生态环境影响对策研究[D].吉林长春:吉林大学,2013.
- [15] Hansen E, Beck L, Obeidat A. Containment Testing and Hydrology Evaluation For Shell's ICP Oil Shale Projects [C]// Jordan International,2012.
- [16] 薛华庆,杜发平,徐文林.油页岩电加热原位开采技术研究进展[J].天然气技术与经济,2010,4(1):18-20.
- [17] Chen C, Gao S, Sun Y, et al. Research on Underground Dynamic Fluid Pressure Balance in the Process of Oil Shale in-situ Fracturing-Nitrogen Injection Exploitation[J]. Journal of Energy Resources Technology,2017,139(3).
- [18] 吕士东.油页岩原位裂解止水注浆实验及数值模拟研究[D].吉林长春:吉林大学,2017.
- [19] 姜鹏飞,孙友宏,郭威,等.压裂-注氮原位裂解油页岩加热工艺及传热模拟[J].北大学学报(自然科学版),2015,36(9):1353-1368.
- [20] 石明生,王复明,刘恒,等.堤坝高聚物定向劈裂注浆试验与有限元模拟[J].水利学报,2016,47(8):1087-1092.
- [21] 吕奇峰.隧道内定向诱导劈裂注浆机理及其配套检测方法研究[D].北京:北京交通大学,2010.
- [22] 黄明利,管晓明,吕奇峰.基于弹性力学的诱导劈裂注浆机制分析[J].岩土力学,2013,(7):2059-2064.
- [23] 杨天鸿.岩石破裂过程的渗流特性:理论、模型与应用[M].北京:科学出版社,2004.
- [24] 姜文忠,张春梅,姜勇,等.水压致裂作用对岩石渗透率影响数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2009,28(5):693-696.
- [25] 谢涛锋,谢文兵,荆升国,等.地下工程劈裂注浆的数学模型研究[J].现代隧道技术,2015,52(2):105-109.
- [26] 门晓溪,唐春安,马天辉.水压致裂作用下岩体参数对裂纹扩展影响的数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(5):700-703.