

文章编号:1671-251X(2016)03-0039-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.03.009

许昭勇,宋大钊,邱黎明,等.煤层水力压裂过程“三场”演化规律特征[J].工矿自动化,2016,42(3):39-43.

煤层水力压裂过程“三场”演化规律特征

许昭勇¹, 宋大钊^{2,3}, 邱黎明¹, 王恩元^{1,2}, 马亚飞¹, 何俊江¹

(1.中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;2.煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;3.永城煤电集团有限责任公司 技术与信息中心,河南 永城 450016)

摘要:根据固液耦合方程与 Mohr-Coulomb 准则,对煤层水力压裂过程进行了数值模拟,研究了煤层裂纹扩展过程中渗流场、应力场和裂隙场(“三场”)的演化过程,结果表明,水力压裂过程中“三场”连续动态变化,水压力是裂隙扩展的动力,裂隙的扩展引起裂隙损伤增加、渗流场以裂隙为中心逐渐扩大、应力场逐渐分化出高应力与低应力区域,最终在主裂隙的垂直方向上形成低应力-高渗透性区域,达到卸压增透效果。

关键词:煤层;水力压裂;渗流场;应力场;裂隙场;“三场”演化;卸压增透

中图分类号:TD713.3 文献标志码:A 网络出版时间:2016-03-07 15:17

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20160307.1517.009.html>

Regularity of three fields evolution of hydraulic fracturing process in coal seam

XU Zhaoyong¹, SONG Dazhao^{2,3}, QIU Liming¹, WANG Enyuan^{1,2}, MA Yafei¹, HE Junjiang¹

(1.School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 3.Technology and Information Center, Yongcheng Coal and Electricity Holding Group Co., Ltd., Yongcheng 450016, China)

Abstract: Numerical simulation was conducted for hydraulic fracturing process in coal seam according to solid-liquid coupling equations and Mohr-Coulomb principle. The evolution of seepage field, stress field and fracture field (three fields) during process of crack propagation in coal seam was analyzed respectively. The results show that the three fields are changing dynamically during the process of hydraulic fracturing. The fracture is motivated to expand by pore water pressure, as a result of which, crack damage increases, seepage field centering to the fracture expands gradually, and high stress area and low stress area are developed from original stress field, and two regimes of low stress and high permeability field in a vertical direction of main fracture are ultimately formed. All of the above contribute to an effect of pressure relief and permeability improvement.

Key words: coal seam; hydraulic fracturing; seepage field; stress field; fracture field; three fields evolution; pressure relief and permeability improvement

0 引言

随着煤炭生产的高效集约化和矿井开采深度的增加,煤矿瓦斯涌出量越来越大,煤与瓦斯突出威胁

也越来越严重^[1-3]。国内外专家学者针对煤与瓦斯突出防治进行了大量研究工作,提出了很多治理方法^[4-5]。前苏联曾做过大量试验,发现当注水压力达到一定值时,高压水可使煤体沿内部的固有裂隙起

收稿日期:2015-11-04;修回日期:2016-01-15;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304205);教育部科学技术研究项目(113031A);中国博士后科学基金项目(2013M541982, 2014T70678)。

作者简介:许昭勇(1990—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为矿山煤岩动力灾害监测,E-mail:heroxuzhaoyong@163.com。

裂和扩展,从而提高煤层的渗透性^[6]。此后,很多学者对煤层水力压裂问题进行了研究:文献[7-9]研究了裂隙扩展问题,提出了裂纹起裂与扩展所遵循的准则;文献[10-12]深入研究了空隙结构与渗透率的关系,认为水力压裂能够有效改善岩体的渗透性。研究表明,水力压裂能够对含瓦斯煤岩体起到良好的卸压增透效果,提高瓦斯抽采效率,目前已成为煤层卸压增透的有效措施^[13-14]。但由于对水力压裂的卸压增透机理尚缺乏深入研究,工程实践中常出现压裂参数选择不当的情况,无法保证水力压裂效果^[15]。深入研究煤层水力压裂机理,特别是裂纹扩展过程中渗流场、应力场与裂隙场(“三场”)的演化规律十分迫切。

本文针对煤层水力压裂过程,建立数值计算模型,模拟研究煤层水力压裂裂纹的扩展规律及“三场”的动态变化特征。研究结果对揭示煤层水力压裂卸压增透机理以及工程应用具有理论指导意义。

1 数值计算模型

水力压裂涉及固液耦合问题。根据 Hooke 定律^[14],煤岩体在地应力和空隙水压力作用下发生弹性变形的阶段满足以应力 σ_{ij} 、应变 ϵ_{ij} 和孔隙水压力 p 表示的本构方程:

$$\sigma_{ij} = 2G\epsilon_{ij} + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\epsilon_{kk}\delta_{ij} - \alpha p\delta_{ij} \tag{1}$$

式中: G 为剪切模量, Pa; ν 为排水泊松比; δ_{ij} 为 Kronecker 符号($i=j$ 时, $\delta_{ij} = 1$; $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$); α 为 Biot 系数,其值取决于介质组分的压缩性。

水力压裂过程中,煤岩体内部应力状态满足 Mohr-Coulomb 准则,当损伤阈值判据 $F \geq 0$ 时,岩石开始发生损伤, F 可表示为

$$F = -\sigma_3 - f_c + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_1 \tag{2}$$

式中: σ_3 为最小主应力, Pa; f_c 为岩石单轴抗压强度, Pa; φ 为岩石的内摩擦角, ($^\circ$); σ_1 为最大主应力, Pa。

根据式(1)、式(2),选择具有固液耦合分析功能的有限元软件 RFPA2D-flow^[15] 进行数值模拟。RFPA2D 模拟程序考虑了材料的非均质性,并以统计分布的形式结合到有限元算法中,依据强度准则对破坏过程进行数值模拟,能够解决岩土工程中很多其他模拟软件无法解决的问题。

本文中数值计算模型如图 1 所示,大小为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。煤岩体力学参数见表 1。为模拟深部煤

层地应力,对该模型施加 25 MPa 水平应力、15 MPa 竖直应力,压裂孔直径为 0.15 m。

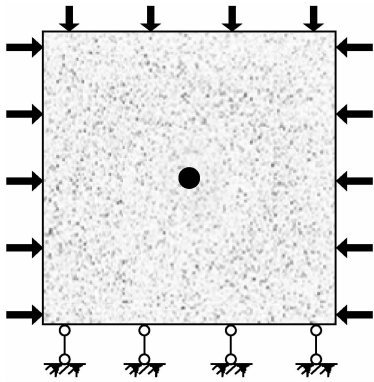


图 1 数值计算模型

表 1 煤岩体力学参数

均质度	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	排水泊松比	内摩擦角/($^\circ$)	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
3	1.6	20	0.25	30	0.5

模拟过程中,在压裂孔内注水增压,初始水压为 2 MPa,每次增加 0.2 MPa,演示煤岩体破坏的完整过程,并对裂纹扩展过程中渗流场、应力场、裂隙场变化规律展开讨论。

2 模拟过程与结果分析

2.1 渗流场模拟过程

渗流场变化过程如图 2 所示。初始加载水压为 2 MPa,渗流场以压裂孔为中心向周围渗透,压裂孔附近水压梯度约为 0.27 MPa/cm,如图 2(a)所示。水压缓慢增大过程中,渗流场形态基本不变。当水压达到 32.8 MPa 时,在压裂孔附近水平方向上出现较小的宏观裂隙,渗流场仍以压裂孔为中心向周围渗透,压裂孔附近水压梯度约为 0.48 MPa/cm,如图 2(b)所示。

产生宏观裂隙后,裂纹开始沿近水平方向快速扩展,裂隙的长度和宽度均随之增加,湿润区域大幅度扩展,渗流场影响区域不断增加,渗流场以裂隙为中心向外渗流,中心水压力逐渐增大。水压梯度随着裂隙的延伸而减小,压裂孔附近的水压梯度随之减小。当水压达到 35.2 MPa 时,压裂孔附近的水压梯度为 0.61 MPa/cm,如图 2(c)所示,表明煤岩体破裂后渗透性增强。当水压达到 36.6 MPa 时,裂隙到达模型边缘(水压达到 36.8 MPa 时,试样完全破裂,认为 36.6 MPa 为加载的最大水压),压裂孔附近的水压梯度增大到 0.68 MPa/cm,如图 2(d)

所示。水力压裂过程中渗流场的演化过程表明,煤岩体内部渗流场分布与裂隙的扩展直接相关,裂隙起裂前,煤岩体内部渗透性变化较小,与水压大致呈

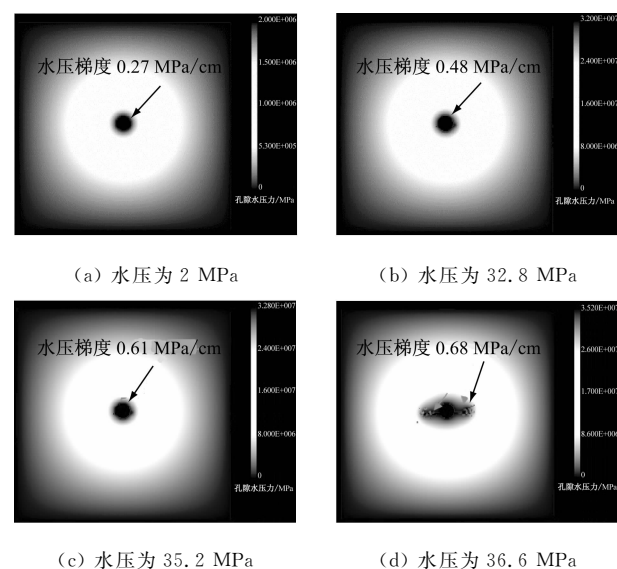


图2 渗流场变化过程

线性相关关系;裂隙起裂后,在水压的作用下,迅速扩展,裂纹周围水压梯度迅速增加,渗透性增强。

2.2 应力场模拟过程

参考文献[13]认为裂隙宽度与剪应力存在线性关系,因此本文研究剪应力场变化过程,如图3所示。加载开始时,距离压裂孔较远处,剪应力分布均匀,平均值为10.75 MPa;压裂孔附近剪应力偏大,如图3(a)所示,表明在孔洞附近形成局部应力集中区。

在裂纹扩展之前,随着水压增大,剪应力先减小,后增大。当水压达到32.8 MPa时,裂纹开始起裂并扩展,如图3(b)所示,此时起裂位置的剪应力为18.54 MPa,因此压裂孔附近煤岩体内部黏聚力约为18.54 MPa。

裂纹扩展过程中,裂纹的尖端剪应力远大于其他部分应力,表明在裂纹尖端产生了较强的应力集中,导致裂纹快速扩展和剪应力场变化,如图3(c)所示。裂隙到达模型边缘前,最大剪应力已增加到51.24 MPa,分布于主裂纹和次级裂纹的尖端,如图3(d)所示。裂纹开始扩展时主要是主裂纹的延伸,水压达到35.2 MPa后开始出现宏观次级裂纹,并随水压增大与主裂纹一起扩展。主裂纹为近水平方向,次级裂纹方向不唯一。

裂纹的扩展引起了剪应力场的分化。水平方向上,在裂纹的前方形成高应力区;竖直方向上,在裂纹的两侧形成一定区域的低应力区,且随着裂纹的

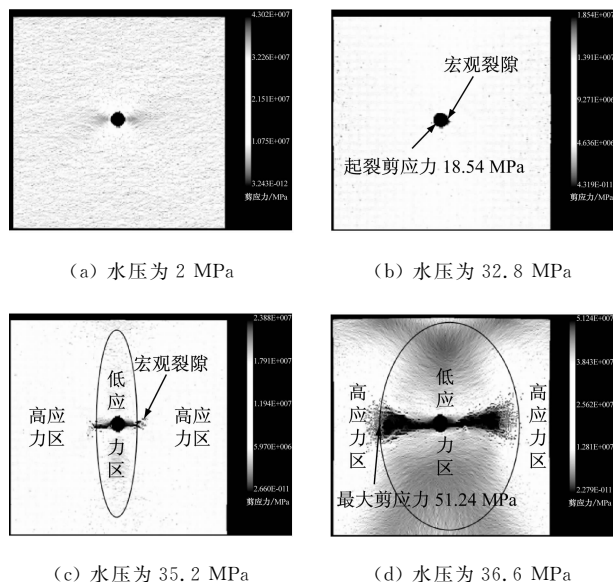


图3 剪应力场变化过程

扩展,低应力区面积逐渐扩大,对整个模型起卸压作用。低应力区的应力小于高应力区应力的1/3。

2.3 裂隙场模拟过程

裂隙变化过程如图4所示。裂隙起裂之前,煤岩体基本没有破裂产生,如图4(a)所示,表明煤岩体在原岩应力及低水压作用下,破裂损伤较小,无法引起裂隙起裂及扩展。水压增加到32.8 MPa时,在压裂孔右侧边缘产生指向水平偏上方向的裂纹,如图4(b)所示,表明其为此次裂纹扩展的起裂点。多次模拟表明,压裂孔一侧起裂之后,在另一侧对称位置会很快起裂,可能是一侧的裂隙起裂后引起另一侧的剪应力集中导致的,表明圆形压裂孔对对称位置的裂纹起裂有促进作用。

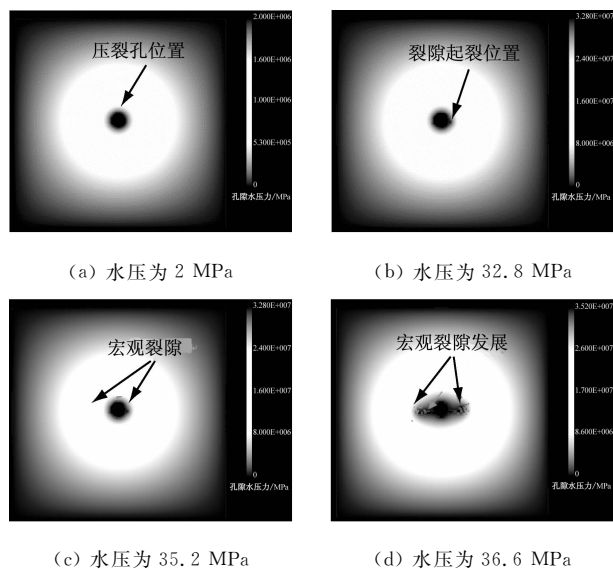


图4 裂隙变化过程

随着水压增大,煤岩体破裂逐渐增多,数值增

大,如图4(c)所示,表明煤岩体损伤速度增加,这可能是尖端应力集中或煤岩体渗透性增强引起的。水压达到36.6 MPa时,模型边缘处煤岩体破裂严重,如图4(d)所示,标志着裂隙扩展到模型边界,此时煤岩体损伤破裂速度很快。形成的主裂隙长约120 cm,平均宽度约为4 cm。

3 “三场”演化规律分析与讨论

天然煤岩体介质通常赋存于地下,周围受地应力环境影响。当人为采取水力压裂措施时,将诱发煤岩体内部微裂纹发生形变、扩展和贯通,裂纹变化过程在影响煤岩体力学性能的同时,也会造成煤岩体渗透性能改变,而煤岩体力学性能和渗透性的变化又将影响煤岩体中应力状态和孔隙压力的分布,导致煤岩体内部裂纹进一步发展,最终达到增加煤层透气性的目的。基于数值模拟结果,本文就“三场”演化过程分析水力压裂卸压增透机理。

在实施水力压裂措施时,由于水压不大,煤岩体处于相对稳定状态,水力压裂措施对于煤岩体裂隙发展和渗透率的影响不显著。随着水压增加,在压裂孔周围开始产生微裂纹扩展,此时压力水进入微孔隙中,导致发生渗流,煤岩体中孔隙水压力的存在,会在微裂纹面上引起发夹张拉应力,从而加剧微裂纹的劈裂扩展,同时水压力的作用会减小有效围压;当水压力达到一定值(本文中为36.6 MPa)时,在压裂孔周围产生大量微裂纹并进一步扩展连接,煤岩体内部发生显著体积变形,煤岩体渗透系数迅速升高,周围煤岩体应力将得到显著释放,起到卸压增透作用。煤层水力压裂过程中渗流场、应力场、裂隙场“三场”演化过程相互渗透,相互影响,总体表现为压力水最先进入煤岩体原有微裂隙中,水压力的增加导致煤岩体微裂隙的发展与连接和周围煤岩体应力的变化。而压裂孔周围煤岩体微裂隙的发展促进压力水的渗流和周围煤岩体应力的释放。

为了直观分析水力压裂的卸压增透机理,统计了水力压裂过程中主裂纹长度及压裂孔附近水压梯度变化,结果如图5所示。

从图5可看出,水力压裂是以水压为动力引起煤岩体损伤破裂的,裂隙逐渐扩展引起裂隙损伤增加,渗流场以裂隙为中心逐渐扩大,最终在裂隙的垂直方向上形成低应力-高渗透性区域,从而达到卸压增透效果。卸压增透效果受水压影响,水压越大,裂隙扩展越长,形成的低应力-高渗透率区域面积越大。

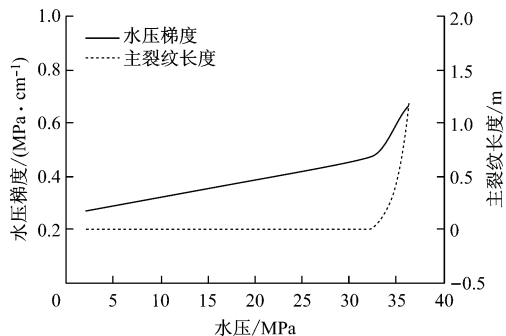


图5 水力压裂过程主裂纹长度与水压梯度变化

4 结论

(1) 根据固液耦合方程与Mohr-Coulomb准则,模拟了煤层水力压裂过程,结果表明,随着水压增大,裂隙逐渐扩展,裂隙损伤增加,渗流场以裂隙为中心逐渐扩大,应力场逐渐分化出高、低应力区域。

(2) 水力压裂是以水压为动力引起煤岩体损伤破裂的,压裂过程中“三场”连续动态变化,最终在主裂隙的垂直方向上形成低应力-高渗透性区域,达到卸压增透效果。施加水压越高,主裂隙越宽且扩展越迅速,卸压增透效果越好。

(3) 模拟发现,水力压裂过程中裂隙的扩展在方向上具有一定的随机性。如何控制裂隙形态,有效节省水压,还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] HUDECEK V H. Analysis of safety precautions for coal and gas outburst-hazardous strata[J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(5): 464-472.
- [2] LAMA R D, BODZIONY J. Management of outburst in underground coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/2/3/4): 83-115.
- [3] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 7-9.
- [4] 黄炳香, 程庆迎, 刘长友, 等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 167-173.
- [5] 辛新平, 高建良, 马耕. 穿层孔吞吐压裂水力强化抽采技术研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(6): 995-1000.
- [6] HANSON M E, SHAFFER R J. Some results from continuum mechanics analyses of the hydraulic fracturing process [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1981, 20(2): 86-94.
- [7] 杨勇, 杨永明, 马收, 等. 低渗透岩石水力压力裂纹扩

展的 CT 扫描[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5):739-743.

[8] 程远方,吴百烈,袁征,等. 煤层气井水力压裂“T”型裂缝延伸模型的建立及应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8):1430-1434.

[9] 李连崇,李根,孟庆民,等. 砂砾岩水力压裂裂缝扩展规律的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1501-1507.

[10] GASH B W, VOLZ R F, POTTER G, *et al.* The effect of cleats orientation and confining pressure on cleat porosity, permeability and relative permeability in coal[C] // Proceedings of International Coalbed Methane Symposium, 1993: 247-256.

[11] LEVINE J R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoir [J]. Geological Society London Special Publications, 1996,109(1): 197-212.

[12] 林柏泉,李子文,翟成. 等. 高压脉动水力压裂卸压增透技术及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3):452-455.

[13] 杜春志. 煤层水压致裂理论及应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2008.

[14] 李贤忠. 高压脉动水力压裂增透机理与技术[D]. 徐州:中国矿业大学,2013.

[15] 袁志刚. 煤岩体水力压裂裂缝扩展及对瓦斯运移影响研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.