

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.02.003

## 煤层气裸眼洞穴完井注气增压数值试验

李晓益<sup>1</sup>, 汪志明<sup>1</sup>, 万 鑫<sup>1</sup>, 张 健<sup>2</sup>

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011)

**摘要:** 煤层气裸眼洞穴完井在我国的应用效果尚不理想, 分析认为, 这与我国对该完井技术的增产机理研究不够深入有一定关系。考虑煤岩特有的垂直裂缝系统, 基于 UDEC 软件建立了模拟煤层气裸眼洞穴完井注气增压过程的离散元数值试验模型, 模拟了不同地应力条件下, 气体注入增压过程中井筒周围煤岩有效应力、孔隙压力和节点位移矢量的分布情况。研究表明: 各向异性储层比各向同性储层更容易产生破裂和坍塌, 从而更利于洞穴的形成; 在垂直裂缝系统中, 流体运移速率不同引起的有效应力差异梯度有利于剪切破裂; 节点位移矢量分布图能够反映注气增压过程中张性裂缝的形成和发展趋势。所建模型在山西寿阳区块煤层气空气造穴试验井——FCC-HZ04-V 井进行了应用, 初步预测得到该井在空气造穴后注气增压引起井筒周围张性裂缝延伸 25 m, 井筒周围 25 m 范围内煤层平均渗透率较初始渗透率增大 7 倍, 验证了煤层气裸眼洞穴完井注气增压可产生自支撑张性裂缝、消除储层伤害、实现增产的机理。

**关键词:** 煤层气 裸眼完井 洞穴完井 离散元法 数学模型 垂直裂缝

**中图分类号:** TE257<sup>+</sup>.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-0890(2012)02-0014-06

## Numerical Experiments of Gas Injection Pressurization for CBM Open Hole Cavity Completion

Li Xiaoyi<sup>1</sup>, Wang Zhiming<sup>1</sup>, Wan Xin<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 2. China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing, 100011, China)

**Abstract:** The stimulation of CBM cavity wells are remarkably successful in the San Juan Basin of the United States while it is not encouraging in improving CBM production in China. Considering its application prospect in the low rank coal seam, the mechanism of openhole cavity completion should be studied further. A discrete element numerical model simulating the process of gas injection for coalbed methane openhole cavity completion was built based on UDEC software. Analysis showed that: anisotropic coal reservoirs are more prone to rupture and collapse than those isotropic ones. In the vertical fracture system, the discrepancy in the fluid velocity would lead to differences in effective stress gradient and help to generate shear fractures. Tensile fractures' generation and growing trend could be reflected by nodal displacement vector distribution. Combined with Shouyang cavity well field test, preliminary forecast showed that the tensile fracture would extend about 25 meters around the wellbore, the average permeability of this tensile fracture influenced area was seven times larger than the initial permeability.

**Key words:** coalbed methane; open hole completion; cavity completion; discrete element method; mathematical model; vertical fracture

裸眼洞穴完井工艺主要包括一系列注入增压过程和放喷卸压过程, 能在目标煤层产生一个扩大的洞穴, 以扩大煤层的暴露面积, 产生张性裂缝和诱导剪切裂缝<sup>[1-2]</sup>, 有效连通井筒和未伤害的储层, 从而大大提高煤层气井的产能。该完井工艺在美国圣胡安盆地 fairway 区块进行了大量应用, 并取得了很好的效果<sup>[3]</sup>: 该盆地的煤层气井中, 有 1/3 采用了裸

收稿日期: 2011-05-12; 改回日期: 2012-02-07。

**作者简介:** 李晓益(1984—), 男, 湖南南县人, 2006 年毕业于长江大学石油工程专业, 油气井工程专业在读博士研究生, 主要从事油气井流体力学与工程、现代完井工程方面的研究。

**联系方式:** (010)89734958, lixiaoyi1984@126.com。

**通讯作者:** 汪志明, wangzm@cup.edu.cn。

**基金项目:** 国家科技重大专项“大型油田及煤层气开发”之课题“煤层气井筛管、洞穴、裸眼等完井技术及设备”(编号: 2011ZX05037-001)资助。

眼洞穴完井,采用该方式完井的煤层气井其累计产气量占了该盆地总产量的 76%。但是,我国目前试验完成的煤层气裸眼洞穴井,增产效果普遍不理想,制约了该工艺在我国煤层气井中的推广应用。洞穴完井工艺在中美两国煤层气井中的应用效果差别很大,除储层物性差异的原因外,在很大程度上还归因于我国对洞穴完井的增产机理研究不深入,未找到适合洞穴完井的储层盆地,不能针对储层物性制定具体的洞穴完井工艺,以致目前试验完成的洞穴井没有真正实现井底压力激动或煤层内部的应力波动。为此,笔者采用 UDEC 软件对煤层气裸眼洞穴完井注气增压过程进行了数值试验,探讨了洞穴完井的增产机理。

## 1 流体连续性控制方程

储层煤岩属于多孔介质,从微观上描述多孔介质中的流体流动没有实际意义,需采用连续介质方法来建立流固耦合问题的控制方程。对于控制体中某一相( $n$ )流体,其真实流动速度与达西流速及固体流速之间的关系式为:

$$v_n = \frac{v_{rn}}{\phi S_n} + v_s \quad (1)$$

$$v_{rn} = \frac{KK_{rn}}{\mu_n} (\nabla p - \rho_n g \Delta H) \quad (2)$$

式中: $v_n$  为流体真实流速, m/s;  $v_{rn}$  为流体达西流速, m/s;  $v_s$  为固体流速, m/s;  $\nabla$  为哈密顿算子;  $S_n$  为流体饱和度;  $\phi$  为孔隙度;  $\mu_n$  为流体黏度, MPa·s;  $p$  为孔隙压力, MPa;  $\rho_n$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $K, K_{rn}$  分别为控制体的绝对渗透率和  $n$  相流体的相对渗透率, mD。

物质导数  $dM/dt$  定义为<sup>[4]</sup>:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial M}{\partial t} + v_s \nabla M \quad (3)$$

式中,  $M$  代表某一相流体质量, kg。

将式(2)和式(3)代入气相和水相的连续性方程<sup>[5]</sup>,忽略流体重力项及饱和度对控制体体积应变的影响,得出煤层气、水两相流体流动与固体变形耦合控制方程为:

$$-\nabla \cdot \left( \frac{KK_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla p \right) - \nabla \cdot \left( \frac{KK_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla p \right) + \phi \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{S_g}{B_g} + \frac{S_w}{B_w} \right) + \left( \frac{S_g}{B_g} + \frac{S_w}{B_w} \right) \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

式中:  $B_g, B_w$  分别为煤层气和地层水体积系数;  $\mu_g, \mu_w$  分别为气和水的黏度, MPa·s;  $K_{rg}, K_{rw}$  分别为

气和水的相对渗透率, mD;  $S_g, S_w$  分别为气和水的饱和度;  $\epsilon_v$  为体积应变。

## 2 煤岩体变形控制方程

根据连续介质假设,煤岩体固体骨架发生的是小应变及小位移,其固体骨架相对有效应力来讲是线弹性的,对于各向同性煤岩材料,可得到以位移表示的考虑孔隙压力的煤岩体变形场方程<sup>[6]</sup>:

$$Gu_{i,ij} + (\lambda + G) u_{j,ij} + a_1 p_{1,j} + a_2 p_{2,j} + F_i = 0 \quad (5)$$

式中:  $G$  为剪切模量,  $G = E/[2(1+\nu)]$ , MPa;  $\lambda$  为拉梅常数,  $\lambda = E\nu/[(1+\nu)(1-2\nu)]$ , MPa;  $E$  为杨氏模量, MPa;  $\nu$  为泊松比;  $u$  为变形位移, m;  $F$  为体力, MPa;  $a$  为 Biot 系数; 下标 1 和 2 代表不同的流体相; 下标  $i$  和  $j$  可取 1, 2, 3 中任意值, 并分别代表  $x, y$  和  $z$  轴。

煤层气储层内流体流动连续性控制方程和煤岩体变形控制方程分别通过式(4)中的孔隙压力项和式(5)中的位移项相互耦合,耦合方程组是非线性的。前人主要通过有限元方法来获得此类流固耦合问题的数值解,常规多孔介质流固耦合问题都是基于 M. A. Biot<sup>[7]</sup> 的岩土三维固结沉降理论建立有限元矩阵求解,因此其限制条件为具有各向同性、均质的多孔介质岩石,其很难真实反映具有端、面割理特性的储层煤岩流体运移和固体变形特性。而离散单元法允许块体发生有限的位移和转动(包括脱离等),并且在计算过程中能够自动识别新的接触面,非常适合分析割理发育的多孔介质流固耦合问题,因此笔者采用离散元方法对煤层气裸眼洞穴完井注气增压过程进行数值试验研究。

## 3 离散元数值试验模型的建立

### 3.1 基本假设

- 1) 模型外边界无穷大;
- 2) 模型中面割理和端割理方向垂直,最大水平主应力方向为面割理方向,最小水平主应力为端割理方向;
- 3) 不考虑煤层中不规则裂缝的存在。

### 3.2 离散元模型的建立

基于 UDEC 软件,建立储层为  $xy$  平面的离散元

模型,模型大小为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ,井眼直径为  $0.3\text{ m}$ ,如图 1 所示。模型模拟了煤岩中特殊的两种裂隙形

态:面割理和端割理,水平方向为连续的面割理,垂直方向为不连续的端割理,整个模型外边界由位移约束。

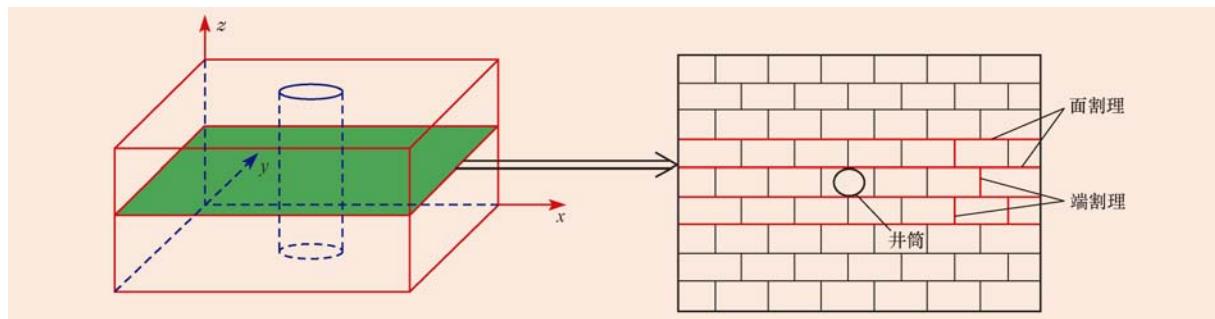


图 1 考虑垂直裂隙系统的煤层气储层水平面模型

Fig. 1 The  $xy$  plane model of CBM reservoir considering vertical fracture system

### 3.3 模型参数

注入流体为氮气,注入速度为  $1.2\text{ m}^3/\text{s}$ ;原始储层压力为  $3.8\text{ MPa}$ ;各向异性应力:最大水平有效应力  $\sigma_{xx}=10\text{ MPa}$ ,最小水平有效应力  $\sigma_{yy}=7\text{ MPa}$ ;各向同性应力: $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=7\text{ MPa}$ 。

煤基质系统:煤岩密度为  $1434\text{ kg/m}^3$ ,内聚力为  $1.9\text{ MPa}$ ,内摩擦角为  $29^\circ$ ,体积模量为  $6.09 \times 10^3\text{ MPa}$ ,剪切模量为  $1.44 \times 10^3\text{ MPa}$ ,抗张强度为  $2\text{ MPa}$ ;节理系统:节理法向刚度为  $6.0 \times 10^3\text{ MPa}$ ,节理剪切刚度为  $2.0 \times 10^3\text{ MPa}$ ,节理内聚力为  $1.2\text{ MPa}$ ,节理内摩擦角为  $28^\circ$ ,节理膨胀角为  $5^\circ$ 。

## 4 试验结果分析

### 4.1 井筒周围有效应力分布

图 2、图 3 分别为各向同性和各向异性地应力条件下,定流量注气增压  $8.5\text{ s}$  后井筒周围煤岩  $x$  和  $y$  方向的有效应力分布云图。从图 2 可以看出,稳定注气增压过程中,各向同性地应力条件下,距离井筒中心相同半径圆周上单元质心  $x$  和  $y$  方向的有效应力都不相等,说明考虑煤岩的割理系统更能真实地反映煤岩在增压过程中的流体运移和基质变形情况。可以预见在快速卸压过程中,这种由于存在端、面割理而产生的有效应力的差异性将更加明显,当井筒周围基质  $x$  和  $y$  方向有效应力的差异梯度超过一定值时,煤岩将产生剪切破裂。该结论与文献[2]相一致。对比图 2 和图 3 可以看出,各向异性地应力条件下,注气增压过程中井筒周围煤岩有效应力改变区域作用范围更广,  $x$  与  $y$  方向有效应力差异梯度更加明显,因此各向异性地应力煤层气

储层更容易在洞穴完井过程中形成应力差异梯度而产生破裂和坍塌,各向异性地应力煤层气储层相对各向同性地应力煤层气储层更适合裸眼洞穴完井。

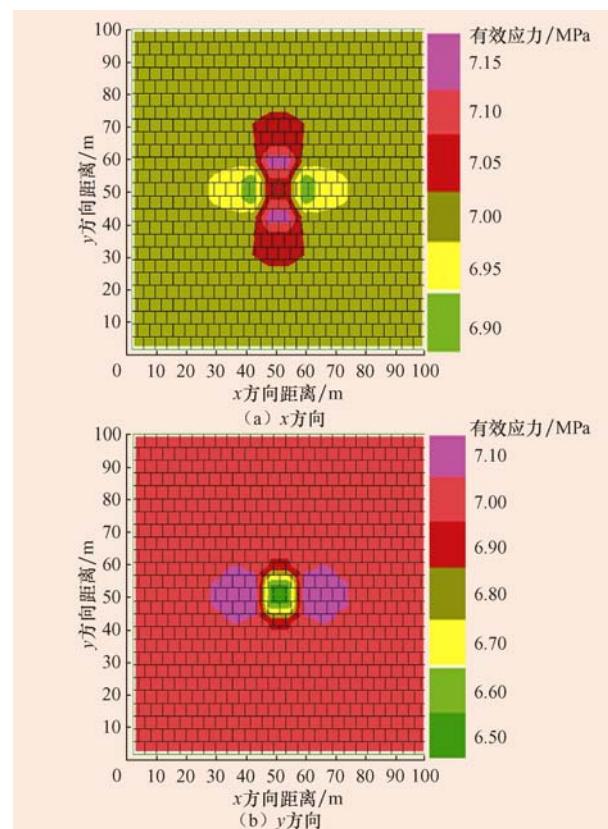


图 2 各向同性应力条件下  $x$  和  $y$  方向的有效应力分布

Fig. 2  $x$  and  $y$  direction effective stress contours under isotropic stress condition

### 4.2 井筒周围孔隙压力分布

图 4 为定压注气气体增压过程中,模型的纵向

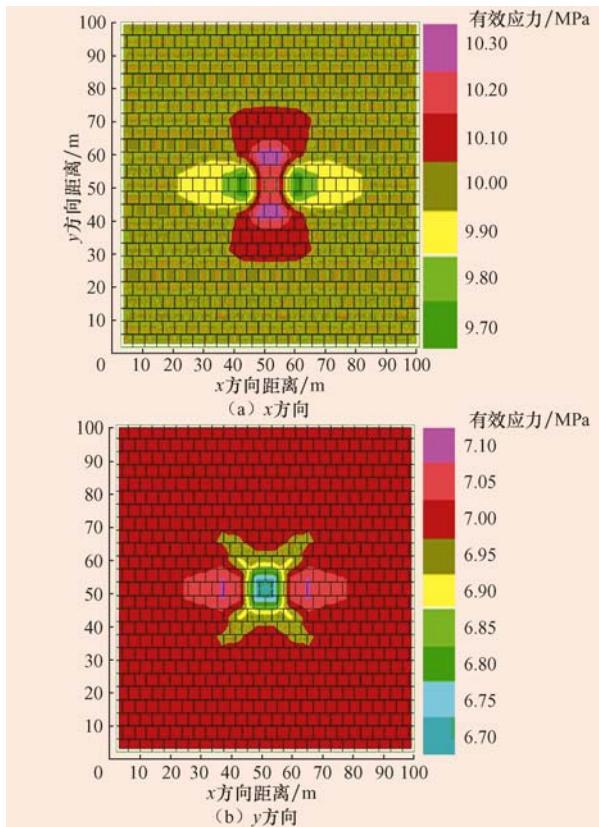
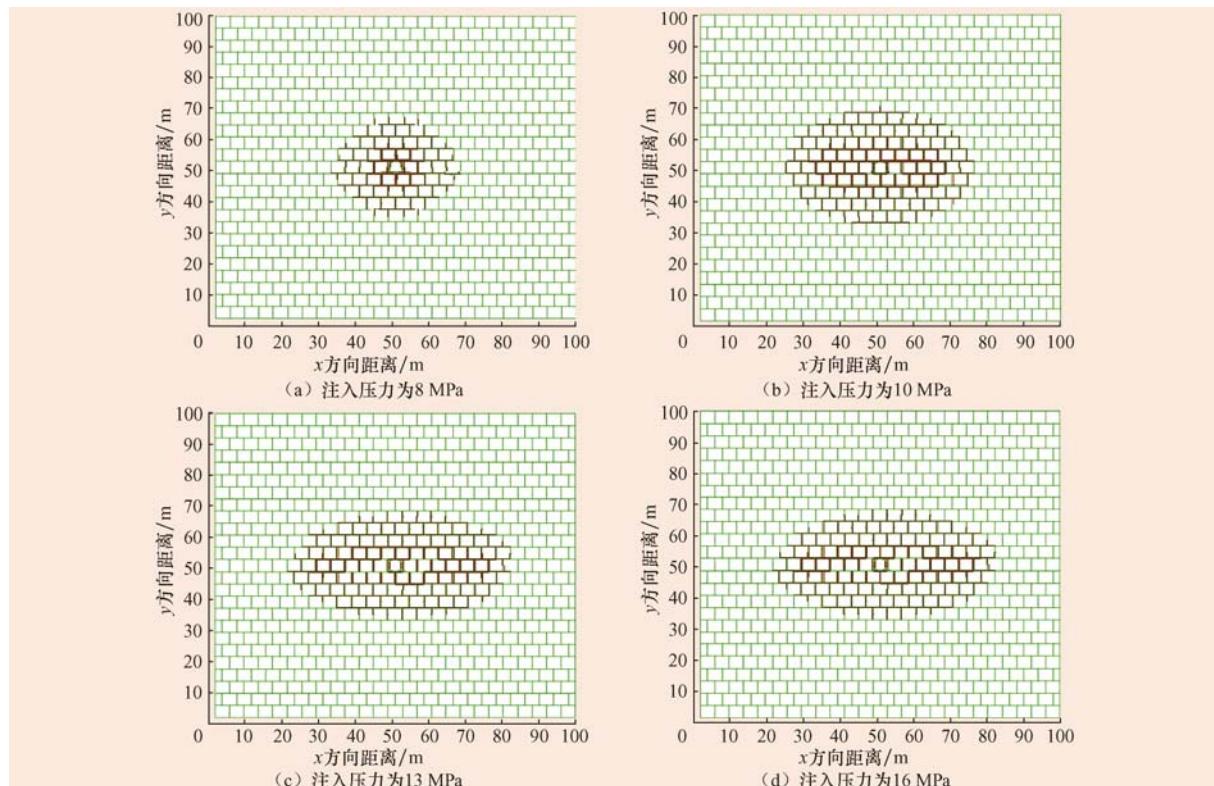
图 3 各向异性应力条件下  $x$  和  $y$  方向的有效应力分布Fig. 3  $x$  and  $y$  direction effective stress contours under anisotropic stress condition

图 4 注入压力分别为 8, 10, 13 和 16 MPa 时的孔隙压力分布

Fig. 4 pore pressure distribution when injection pressure at 8, 10, 13 and 16 MPa, respectively

位移量不发生变化时,井筒周围孔隙压力分布。从图 4 可以看出,随着注入压力的增大,模型中孔隙压力增大的区域逐渐向井筒外围扩大,面割理方向的孔隙压力扩散速度和影响区域远大于端割理方向。基于此,在卸压时,由于面割理方向和端割理方向的流体运移速度不同,必然导致垂直裂缝系统相垂直两个方向的孔隙压力梯度不同,从而在两个方向上产生不同的渗流力,引起有效应力差异梯度而有利于产生剪切破裂。

#### 4.3 节点位移矢量分布

图 5 为定压注入气体增压过程中,模型的纵向位移量不发生变化时,井筒周围节点位移矢量分布。从图 5 可以看出:随着注入压力的增大,模型中发生位移变化的单元节点逐渐增多;增压开始时,具有位移趋势的节点由井壁四周向井筒  $y$  轴正负两方向(最小水平主应力方向)发展;随着压力的进一步增大,井筒周围  $y$  方向的节点位移趋势更加明显,并且有朝  $x$  方向(最大水平主应力)发散的趋势,说明注入增压过程沿面割理方向产生张性裂缝,并随着压力的增大而扩展。图 5 真实地反映了煤层气裸眼洞穴完井增压过程中储层煤岩张性裂缝的产生和发展趋势。

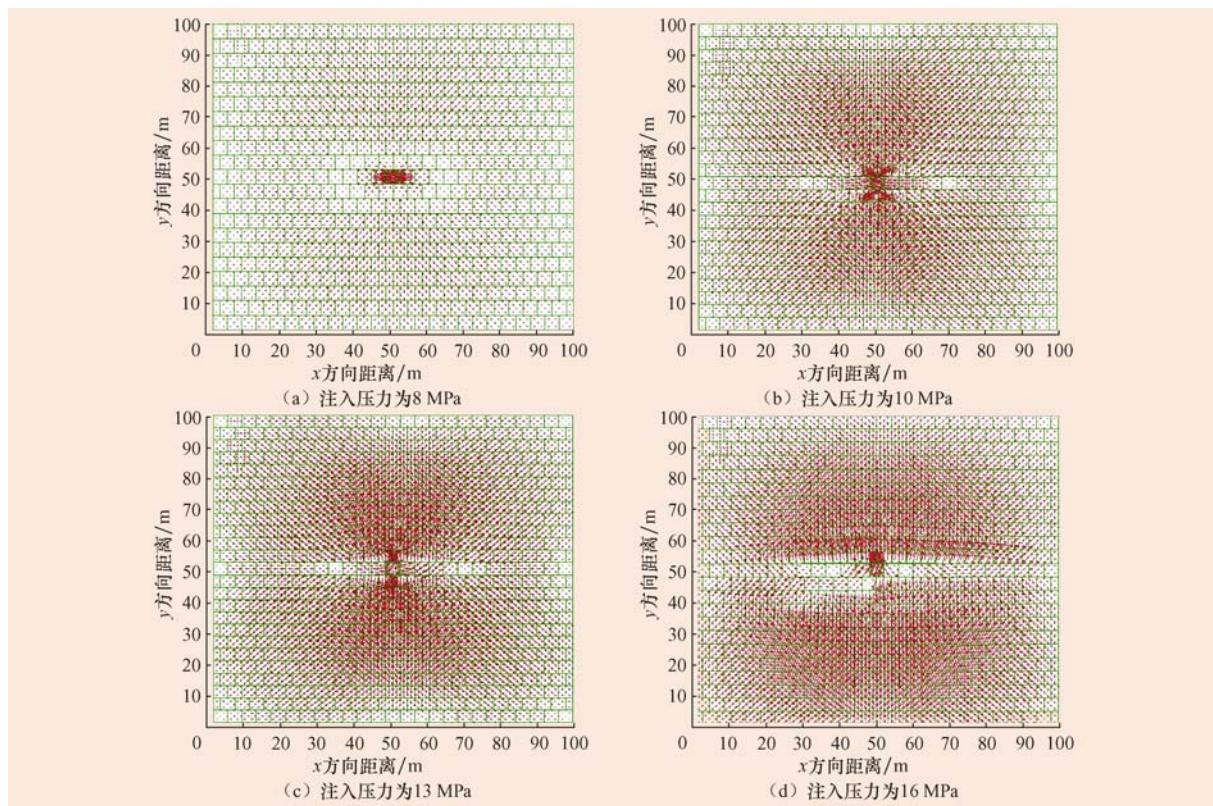


图 5 注入压力分别为 8, 10, 13 和 16 MPa 时的节点位移矢量分布

Fig. 5 Node displacement vector distribution when injection pressure at 8, 10, 13 and 16 MPa, respectively

## 5 应用实例

山西寿阳区块位于沁水盆地东北角, 主要含煤地层为山西组和太原组地层, 3 号和 15 号煤层为主要目标层, 埋深 500~600 m, 最小水平地应力 7 MPa<sup>[8]</sup>。在该区块的 FCC-HZ01-V 井和 FCC-HZ04-V 井进行了煤层气空气造穴现场试验。试验采用两台空气压缩机、一台增压机, 额定排气压力为 10 MPa。FCC-HZ01-V 井在造穴前无气体产出, 造穴后产量达到了 25 m<sup>3</sup>/h; FCC-HZ04-V 井同样在造穴前无气体产出, 造穴后产量达到 30 m<sup>3</sup>/h, 最高达到 92 m<sup>3</sup>/h。第一轮造穴后, 产量稳步上升, 三个月后单井产量达到 2 000 m<sup>3</sup>/d, 效果良好。

采用 UDEC 软件对该区块进行了注气增压数值试验, 试验结果见图 5。从图 5 可以看出, 定压 10 MPa 注气增压过程中, 节点位移矢量改变区域大概为 10~25 m 的圆周区域。采用 Eclipse 软件对该区块单煤层气直井进行了产能拟合, 煤层初始渗透率为 0.5 mD, 孔隙度为 0.02, 煤层厚度为 6.5 m, 煤层温度为 314 K, 煤层原始压力为 3.36 MPa, 临界解吸压力为 2.53 MPa, Langmuir 压力常数为 3.125 MPa, Langmuir 体积常数为 44.27 m<sup>3</sup>/t, 压

缩系数为 0.062 MPa<sup>-1</sup>。通过局部网格加密技术, 分别设置井眼周围 25 m 区域内的平均渗透率为 0.1, 0.5, 1.0 和 3.6 mD。基于单井产能拟合反演井筒周围渗透率的改善作用, 可得到不同渗透率条件下煤层气直井的日产气曲线(如图 6 所示)。

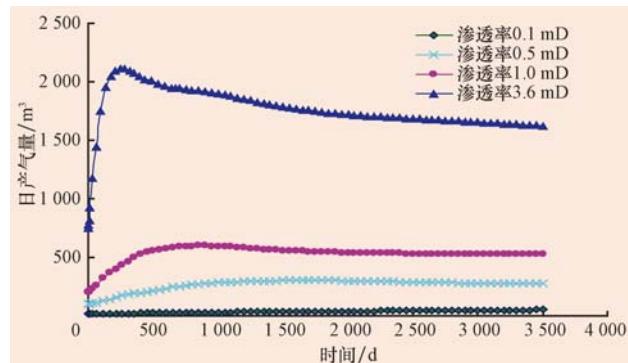


图 6 不同渗透率条件下的直井日产气量拟合曲线

Fig. 6 FGPR graphs under different permeability

从图 6 可以看出: 井筒周围 25 m 区域内的渗透率为 0.1 mD 时, 直井几乎不产气; 渗透率为 3.6 mD 时, 直井产气最高可达 2 200 m<sup>3</sup>/d, 稳定后保持在 1 800 m<sup>3</sup>/d 左右。分析认为: FCC-HZ01-V 井和 FCC-HZ04-V 井在钻完井过程中造成了储层伤害, 使井筒周围渗透率低于原始储层渗透率 0.5 mD, 因

而无气体产出;进行空气造洞穴之后,产生自支撑的张性裂缝可有效消除储层伤害,增大井筒周围的煤岩渗透率。经初步预测,FCC-HZ04-V 井在空气造穴以后,注气增压引起井筒周围张性裂缝延伸 25 m,井筒周围 25 m 范围内的煤岩储层平均渗透率较初始渗透率增大 7 倍。

## 6 结 论

1) 各向异性储层比各向同性储层更容易产生破裂和坍塌,流体在垂直裂缝系统中运移速率不同引起的有效应力差异梯度有利于储层形成剪切破裂,节点位移矢量分布图能够真实反映煤层气裸眼洞穴完井增压过程中煤储层张性裂缝的产生和发展趋势。

2) 结合山西寿阳区块空气造穴现场试验,初步预测得到 FCC-HZ04-V 井在空气造穴后注气增压引起井筒周围张性裂缝延伸 25 m,井筒周围 25 m 范围内煤岩储层平均渗透率较初始渗透率增大 7 倍,验证了煤层气裸眼洞穴完井增压过程中可产生自支撑张性裂缝、消除储层伤害、实现增产的机理。

## 参 考 文 献

### References

[1] Mavor M J, Logan T L. Recent advances in coal gas-well open-

- hole well completion technology [J]. Journal of Petroleum Technology, 1994, 46(7): 587-593.
- [2] Palmer I D, Mavor M J, Spitler J L, et al. Openhole cavity completions in coalbed methane wells in the San Juan Basin [J]. Journal of Petroleum Technology, 1993, 45(11): 1072-1080.
- [3] Shi J Q, Durucan S, Sinka I C. Key parameters controlling coalbed methane cavity well performance [J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 49(1): 19-31.
- [4] Lai W M, Rubin D, Krempel E. Introduction to continuum mechanics [M]. New York: Pergamon Press, 1974: 22-25.
- [5] 汪志明, 李晓益, 张健. 低渗透煤层气藏直井开采数值模拟研究 [J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 144-147.  
Wang Zhiming, Li Xiaoyi, Zhang Jian. Numerical simulation of vertical well for low-permeability coal seam gas reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(3): 144-147.
- [6] 徐涛, 唐春安, 宋力, 等. 含瓦斯煤岩破裂过程流固耦合数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1667-1673.  
Xu Tao, Tang Chun'an, Song Li, et al. Numerical simulation of coupled gas flow in failure process of gassy coal-rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1667-1673.
- [7] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.
- [8] 黄勇, 熊涛. 洞穴完井工艺在寿阳地区煤层气钻井中的应用 [J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(2): 61-64.  
Huang Yong, Xiong Tao. Application of well caving completion technology in CBM drilling in Shouyang Area [J]. Coal Geology of China, 2008, 20(2): 61-64.

## 欢迎订阅 2012 年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年,是由中国石油化工集团公司主管、中国石化集团石油工程技术研究院主办的科技期刊,是全国中文核心期刊和历年全国科技论文统计源刊,被美国《石油文摘》、《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录。国内连续出版物号:CN11 - 1763/TE, 国际连续出版物号:ISSN1001 - 0890。

《石油钻探技术》主要报道国内石油工程(包括钻井、钻井液、固井、完井、开采等专业)以及钻采机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验,适当介绍国外石油工程技术发展的水平和动向。本刊栏目为:专家视点、钻井完井、油气开采、钻采机械、现场交流、科技信息。适合于广大石油工程技术人员、石油类高等院校师生和油田企业经营管理者阅读。

《石油钻探技术》为双月刊,大 16 开版本,逢单月末出版。2012 年每期定价 15 元(含邮寄费),全年 6 期共 90 元。自办发行,邮汇与电汇均可。欢迎有关单位和个人及时订阅,可破季订阅。订阅办法:

- 登录本刊网站(<http://www.syzt.com.cn>)下载期刊订阅单,认真填写订阅单及汇款单,切勿潦草,以免因地址不详而无法邮寄。
  - 银行汇款:工行北京市海淀支行,帐号 0200049629200702219,户名“中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院”,开户行代码 102100004960,并注明“期刊”字样。
  - 邮局汇款:北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 710 室,邮编 100101,收款人:刘文臣。
- 联系电话:010 - 84988356, 84988317; 传真:010 - 84988316; E-mail: syzt@vip.163.com。