

文章编号:0253-9993(2012)12-2083-04

基于离散单元法的筛管内煤灰颗粒通过性分析

黄中伟¹,李根生¹,王开龙²,申瑞臣²,闫相祯³,金磊¹,邸飞¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;2. 中国石油集团 钻井工程技术研究院,北京 100195;3. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:基于离散单元法,用 PFC2D 软件建立了煤灰颗粒通过筛管的颗粒流模型,研究了筛管内煤灰细观颗粒的通过能力,分析了粒间连接强度、缝径比和围压等参数对筛管内煤灰颗粒通过性的影响规律。结果表明:随着颗粒间连接强度的增加,通过割缝的颗粒体积线性减少;筛管内通过割缝的颗粒体积随缝径比的增大呈增大的趋势,同时为保证煤层结构稳定,缝径比应小于 10;总体上讲,穿过割缝的颗粒体积随围压的增大而增加,但存在一定的跃升平台,即在某一井深范围内,煤灰颗粒通过割缝的体积量稳定。

关键词:离散单元法;筛管;颗粒;连接强度;围压

中图分类号:P618.11;TE21 **文献标志码:**A

Analysis of coal particles passing slotted screen based on discrete element method

HUANG Zhong-wei¹, LI Gen-sheng¹, WANG Kai-long², SHEN Rui-chen², YAN Xiang-zhen³, JIN Lei¹, DI Fei¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Drilling Engineering, CNPC, Beijing 100195, China; 3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: On the basis of discrete element method, this paper built the particle flow model of coal particles through slotted screen with PFC2D software, presented the ability of coal micro-particles through slotted screen, as well as the influence of parameters, including joint strength between particles, slot width divided by particle diameter and ambient pressure. The results show that the passed particle linearly decreases with the joint strength increasing. As the ratio of slot width divided by particle diameter going up, the passed particles increase correspondingly. And to ensure coal-bed structure stable, the ratio should be less than 10. Besides, the volume increases with ambient pressure rising, yet there is certain jumped platforms, which means the volume will be stable in some depth ranges.

Key words: discrete element method; screen pipe; particles; joint strength; ambient pressure

离散单元法(Discrete Element Method, DEM)是研究不连续体问题的一种数值模拟方法,最早由 Cundall 在 1971 年提出,用于岩石力学问题分析^[1],后在 1979 年被 Cundall 和 Strack 应用于土体研究^[2]。其基本原理是将所研究对象划分为离散单元的集合,单元间有一定的初始接触,随着单元的运动,调整各单元间的接触关系,从而得到散粒体的整体运动性。目前离散单元法在数值模拟理论和工程应用方面取得了很大的进展,特别适合离散颗粒组合体在准静态

或者动态下的变形过程分析^[3-5]。

在油气开采的实际工程中,为了最大程度地保持煤层原始渗透率,有效防止疏松储层出砂和井眼坍塌,满足产层防砂、分层分采的要求,采用筛管完井是一条有效途径^[6-8]。在地层中下入筛管以后,割缝的存在将影响筛管周围的煤岩变形、颗粒位移,而地层岩体的各种基本性质也会影响地层出砂状况^[9-11]。目前,国内外对割缝筛管的设计及应用研究较多^[12-14],但对筛管内细观颗粒通过能力的研究较少。

收稿日期:2011-10-21 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50874113);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05037-001)

作者简介:黄中伟(1972—),男,山东东明人,副教授,博士。Tel:010-89733379, E-mail:huangzw@cup.edu.cn

本文根据煤层高度非连续性和各向异性的特点^[15],采用基于离散单元法的 PFC2D 颗粒流软件,建立了割缝附近局部范围内的煤层的颗粒流模型,对煤层出砂的过程进行细观数值模拟,分析了煤灰颗粒连接强度、缝径比、围压等不同参数下颗粒通过割缝筛管能力,研究结果可望为煤层气井割缝筛管完井中割缝筛管缝隙大小的选择提供参考依据。

1 PFC2D 颗粒流模拟

1.1 颗粒流基本理论

PFC2D(Particle Flow Code in 2 Dimensions)即二维颗粒流程序,可通过离散单元法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用。颗粒流理论及其数值方法,作为一种特殊的离散元法,克服了传统连续介质力学模型的宏观连续性假设,从细观层面上对工程特性进行数值模拟、分析宏观力学行为,在整个计算过程中选择的计算时步要足够小,以至于在每一时步内颗粒间的扰动只影响到与其直接相邻的颗粒,作用于任何颗粒上的力仅由与其相互接触的颗粒决定^[16-17]。

1.2 参数设定与模型建立

在实际工程中能够穿过割缝缝隙的煤灰颗粒一般是煤层中黏聚力较小的“游离”颗粒,煤灰颗粒细度 300~400 目(37~45 μm),计算时颗粒平均直径取 0.04 mm,设置颗粒间的摩擦因数为 0.5。考虑到容易发生出砂现象的煤层气井大多为黏结强度不大的煤灰颗粒,因此采用 PFC 中的滑动模型来进行模拟。数值模拟中的所有筛管均采用 J-55 石油钢管,外径 139.7 mm,壁厚 6.2 mm,割梯形缝,交错水平布缝,其所对应的杨氏模量为 1 178 MPa,泊松比为 0.24。

为了能更加准确地描述颗粒在割缝缝隙中的通过性,对模型规格进行相关简化,建立割缝周围某一小范围内的模型。定义矩形的模型箱墙体,边长为割

缝宽度的 10 倍,上下边以及右边为所要建立模型箱的其中 3 个边界,左边表示筛管壁,在局部小范围内将筛管壁近似看作直线来处理(图 1)。

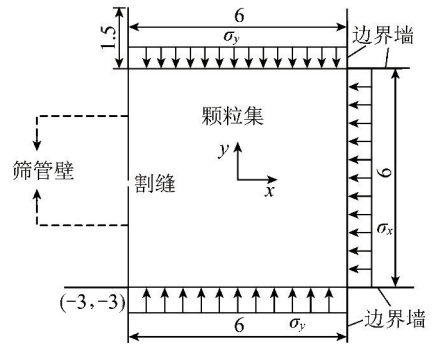


图 1 煤灰在筛管内通过性的颗粒流模型
Fig. 1 Particle flow code model of coal particles passing through slotted screen

2 颗粒通过性影响因素分析

在模型箱内部生成具有一定孔隙率的颗粒,模拟地层煤层,按随机位置将颗粒在区域内填充,通过循环来消除试样内部非均匀应力;然后以伺服控制的墙体对模型在 x, y 两个方向施加应力,分别代表岩体在原有地应力作用下的大主应力和小主应力。最后删除左侧墙体,在左侧以两段不连续墙段代替原有的墙体,这两段墙体之间的缝隙就表示筛管的割缝。初始化所有颗粒的速度、位移均为 0;继续进行循环计算,并改变相关参数,研究颗粒在缝隙中的通过性能。

2.1 粒间连接强度对颗粒通过性的影响

粒间连接强度主要是通过影响煤层中颗粒之间的相互约束作用来影响颗粒在筛管缝隙中通过性的。粒间连接强度越大,整个颗粒集合在宏观上就越表现出黏性土的性质。通过不断改变颗粒间连接强度,观察穿过割缝的颗粒总体积情况(图 2(a)),颗粒的细观参数取值见表 1。

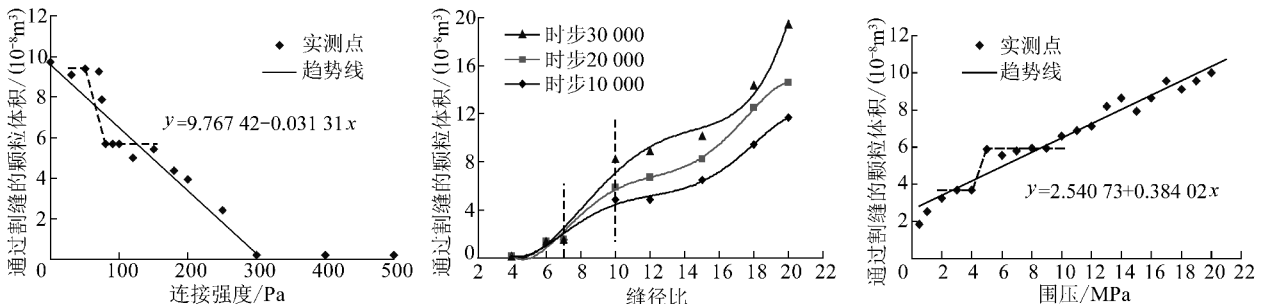


图 2 通过割缝的颗粒体积随粒间连接强度、缝径比和围压的变化关系

Fig. 2 Relationship between particle volume and joint strength, particles ratio(slot width divided by particle diameter), ambient pressure

表 1 粒间连接强度、缝径比和围压对通过性影响的各细观参数值

Table 1 Mesoscopic parameters of joint strength, particles ratio (slot width divided by particle diameter), ambient pressure between particles influencing on passing ability

最小粒径/mm	缝径比	颗粒				墙体			
		法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	围压/MPa	摩擦因数	连接强度/Pa	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	
0.02	3	5	2.5	6	0.2	变化参数	10	10	
0.02	变化参数	5	2.5	8	0.5	150	10	10	
0.02	3	5	2.5	变化参数	0.5	150	10	10	

由图 2(a)可以看出,颗粒间连接强度越大,穿过割缝的颗粒数目就越少,当连接强度值增加到一定的值后(100~150 Pa),颗粒体积变化不大,基本维持在一个稳定的值。当颗粒间的连接强度继续增加时(大于 300 Pa),周围煤层对割缝处颗粒的约束作用较大,虽然颗粒会在地层应力作用下出现受拉的状态,但是该拉力小于颗粒间的抗拉强度,因此通过割缝的颗粒体积几乎为 0,即割缝处的颗粒不会进入筛管。

2.2 缝径比对颗粒通过性的影响

分别采用 1 万、2 万、3 万步计算时步,通过不断改变缝径比(这里将割缝宽度与颗粒粒径的比值定义为缝径比),观察穿过割缝的颗粒总体积情况(2(b)),颗粒的细观参数取值见表 1。

由图 2(b)可以看出,在不同计算时步下,穿过割缝的颗粒体积随缝径比的增加而增大,只是增大的速率不同。当缝径比分别为 7.5 和 10.0 时,煤层破坏范围变化明显。在缝径比小于 7.5 时,煤层破坏范围极小,可以认为虽然有少数颗粒穿过割缝进入筛管,但是整体的煤层结构并没有发生破坏。当缝径比大于 10 时,煤层破坏范围迅速增大。可见,存在一个可以保证煤层结构稳定的缝径比的临界值。

2.3 围压对颗粒通过性的影响

通过改变围压,观察穿过割缝的颗粒总体积情况(图 2(c)),颗粒的细观参数取值见表 1。

由图 2(c)可以看出,穿过割缝的颗粒体积随围压的增大而增加。但从局部上看,曲线也出现了“平台”与“激变”的阶段。当围压较小时,周围煤灰对割缝处颗粒的挤压力小于颗粒间的抗挤强度,因此割缝处的颗粒不会进入筛管;当围压在 1~4 MPa 时,通过割缝的颗粒体积变化不大。而第 1 个“平台”过后,当围压继续增加到 4 MPa 时,通过割缝的颗粒体积迅速增加;随着围压继续增加(5~10 MPa),通过的颗粒体积再次基本维持稳定。由此可以看出,割缝筛管完井时,煤灰颗粒通过割缝的体积量并不完全随着井深的增加而线性增加,而是存在跃升的台阶。

3 认识及建议

(1)通过割缝的颗粒体积随着颗粒之间连接强度的增加线性减小,当连接强度值增加到一定的值后(300 Pa),穿过割缝的颗粒体积保持稳定。

(2)就总体趋势来说,穿过割缝的煤灰量随缝径比的增大而增大,为保证煤层结构稳定,缝径比一般应小于 10。由此可以根据已采出的煤灰颗粒平均直径确定某一区块煤层气井割缝筛管完井时割缝的宽度。

(3)通过割缝的颗粒体积随围压的增加总体趋势是增加,但存在跃升平台,即在某一井深范围内(围压基本保持不变),煤灰颗粒通过割缝的体积量稳定。

(4)随着煤层气开发规模的逐步增加,建议开展割缝筛管完井时煤灰颗粒通过性室内实验,进而验证数值模拟结果,为提高煤层气井的开采效率、节约地面处理煤灰的成本打下基础。

参考文献:

- [1] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky system [A]. Muller Led. Proceedings of Symposium of the International Society of Rock Mechanics [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1971(1):8-12.
- [2] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical method for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1):47-65.
- [3] 周先齐,徐卫亚,钮新强,等. 离散单元法研究进展及应用综述 [J]. 岩土力学, 2007, 28(S0):408-416.
Zhou Xianqi, Xu Weiya, Niu Xinqiang, et al. A review of distinct element method researching progress and application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S0):408-416.
- [4] 王泳嘉, 刑纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用 [M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [5] 桂夏辉, 李延锋, 刘炯天, 等. 液固流化床内颗粒沉降特性试验研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(8):1374-1379.
Gui Xiahui, Li Yanfeng, Liu Jiongtian, et al. Study on settlement characteristic of the grain in fluidized bed [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8):1374-1379.
- [6] 邓旭. 割缝筛管的结构设计与强度数值模拟分析 [J]. 江汉石

- 油科技,2009,19(2):49-54.
- Deng Xu. Structure design and strength numerical simulation of slotted screen[J]. *Jiangnan Petroleum Science and Technology*,2009,19(2):49-54
- [7] 杨立辉,李春福,宋开红,等. 316L 不锈钢膨胀筛管基管井下膨胀有限元分析[J]. *石油机械*,2011,39(8):11-15.
- Yang Lihui, Li Chunfu, Song Kaihong, et al. A finite element analysis of the downhole expansion of the base tube of the 316L stainless steel expandable screen[J]. *China Petroleum Machinery*,2011,39(8):11-15.
- [8] 王同涛,闫相祯,杨秀娟. 基于塑性铰模型的煤层气完井筛管抗挤强度分析[J]. *煤炭学报*,2010,35(2):273-277.
- Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan. Collapse pressure of perforated liner casing in CBM exploration based on plastic hinge model[J]. *Journal of China Coal Society*,2010,35(2):273-277.
- [9] 王平全,梁大川,崔茂荣,等. 吐哈盆地西山窑八道湾煤层井壁不稳定机理探讨[J]. *西南石油学院学报*,1995,17(2):55-64.
- Wang Pingquan, Liang Dachuan, Cui Maorong, et al. Study on instability mechanism of Xishanyao and Badaowan coal seam wellbore in Tuha Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*,1995,17(2):55-64.
- [10] 梁大川,蒲晓林,徐兴华. 煤岩坍塌的特殊性及钻井液对策[J]. *西南石油学院学报*,2002,24(6):28-31.
- Liang Dachuan, Pu Xiaolin, Xu Xinghua, et al. Particularity of coal collapse and drilling fluid counter measure[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*,2002,24(6):28-31.
- [11] 屈平,申瑞臣,付利,等. 煤层井壁稳定的时间延迟效应探讨[J]. *煤炭学报*,2011,36(2):255-260.
- Qu Ping, Shen Ruichen, Fu Li, et al. Time delay effect on wellbore stability in coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*,2011,36(2):255-260.
- [12] Olsen T N, Brenize G, Frenzel T. Improvement processes for coalbed natural gas completion and stimulation[J]. *SPE 84122*,2003.
- [13] 刘大红,宋秀英,刘艳红,等. 割缝筛管防砂设计及应用[J]. *石油机械*,2004,32(8):13-16.
- Liu Dahong, Song Xiuying, Liu Yanhong, et al. Slotted screen design and its application to oil/water wells in sand control[J]. *China Petroleum Machinery*,2004,32(8):13-16.
- [14] 石晓兵,施太和,王兆会,等. 岩芯粒度分析分选评价及割缝筛管缝宽设计[J]. *石油钻采工艺*,1999,21(4):43-47.
- Shi Xiaobing, Shi Taihe, Wang Zhaohui, et al. Analytical evaluation of rock grain size and design for slotted screen liner[J]. *Oil Drilling & Production Technology*,1999,21(4):43-47.
- [15] 申瑞臣,屈平,杨恒林. 煤层井壁稳定技术研究进展与发展趋势[J]. *石油钻探技术*,2010,38(3):1-7.
- Shen Ruichen, Qu Ping, Yang Henglin. Advancement and development of coal bed wellbore stability technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*,2010,38(3):1-7.
- [16] 周健,池永,池毓蔚,等. 颗粒流方法及 PFC2D 程序[J]. *岩土力学*,2000,21(3):271-274.
- Zhou Jian, Chi Yong, Chi Yuwei, et al. The method of particle flow and PFC2D Code[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2000,21(3):271-274.
- [17] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D particle flow code in 2 dimensions user's guide[M]. Minneapolis,2002.

本刊讯:根据 Ei 中国信息部发布的最新收录结果,本刊 2012 年第 1~10 期和增刊第 1 期共发表论文 355 篇,其中 Ei Compendex 收录论文 355 篇,收录率 100%。