

文章编号: 1001-1986(2010)03-0027-05

范各庄矿 12 煤底板突水过程模拟分析

刘洪磊, 杨天鸿, 于庆磊, 陈仕阔, 魏晨慧

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 以范各庄煤矿水文地质条件为基础, 建立了承压水上采煤的岩体水力学模型, 应用岩石破裂过程渗流-应力耦合分析系统(RFPA^{2D}-Flow)模拟分析了范各庄矿 12 煤层底板开采扰动下, 裂隙形成、扩展到突水通道最终贯通形成突水的全过程。通过对损伤区分布、应力场和渗流场的演化分析, 揭示了开采扰动及水压驱动下完整泥岩底板由隔水岩层到突水通道的演化过程, 对突水通道进行了模拟定位, 并对不同水压条件下含水砂岩层对底板突水的影响进行了分析。结果表明: 12 煤底板突水问题取决于含水砂岩中的水压力, 在假设隔水层厚度不变时, 水压力与突水系数呈正相关关系, 随着水压的增大突水越易发生。该研究为 12 煤底板突水预测与防治提供了理论依据。

关键词: 范各庄煤矿; 底板突水; 突水通道; 数值模拟

中图分类号: TD741; P641.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.007

Numerical analysis on the process of water inrush from the floor of seam 12 in Fangezhuang coal mine

LIU Honglei, YANG Tianhong, YU Qinglei, CHEN Shikuo, WEI Chenhui

(College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Based on the hydrogeological conditions in Fangezhuang coal mine, the hydraulic model for rock mass in coal mining with confined water was constructed. The author applies coupling system of flow & solid in rock failure process analysis to simulate and study the whole process of the initiation of fractures, extension and formation of groundwater inrush pathway. With the analysis of damage distribution, stress and seepage field evolution, the process of the evolution from water-resisting strata to inrush pathway about the floor of complete mudstone under the condition of mining disturbance and hydraulic driving is clearly revealed, and the water rush pathways are determined. Furthermore, the effects of water inrush under different water pressures in sandstone are discussed. The results show that the water inrush of coal seam 12 depends on the pressure of water in sandstone. The water pressure has a positive correlation with water bursting coefficient in the conditions of mudstone thickness, with the increasing water pressure, water inrush becomes easier. This research provides theoretical basis for forecasting and prevention of water inrush from the floor of coal seam 12.

Key words: Fangezhuang coal mine; floor water inrush; water inrush pathways; numerical simulation

我国煤矿水文地质条件复杂, 水灾严重。近年来, 随着矿山开采深度的增加, 水压不断增大, 深部开采的水害问题日益严重, 煤矿突水已成为影响煤矿安全生产的重大问题^[1-3]。采动应力和水压力共同作用下岩层破断突水通道的形成过程是突水机理研究的核心内容和关键问题^[4-7], 其发生机制是动力扰动和水压驱动下岩层裂纹萌生、扩展、水压跟踪传递, 直到最后裂纹贯通导致失稳破裂的复杂过程。因此在研究底板突水问题时描述岩体破裂后渗透率的突变和水压力跟踪传递全过程成为揭示底板突水

机理的关键。

1984 年 6 月 2 日, 开滦矿务局范各庄煤矿 2171 综采工作面发生世界采矿史上罕见的重大突水事故, 造成该矿和临近 3 个矿井被淹的重大灾难^[8]。因此研究范各庄煤矿 12 煤底板突水问题, 对该煤矿安全生产具有重要指导意义和实用价值。本文应用岩石破裂过程渗流-应力耦合分析系统 RFPA^{2D}-Flow, 能够从流固耦合的角度模拟分析底板隔水层破断突水的全过程, 该系统能够直观地反映出煤层底板最易发生涌水的位置和涌水全过程。

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209405); 国家自然科学基金项目(50874024, 10872046, 50904013); 东北大学优秀博士论文培育基金(N090601003); 东北大学创新团队建设项目(N090101001)

作者简介: 刘洪磊(1981—), 男, 山东枣庄人, 博士研究生, 从事岩石力学方面的研究工作。

1 数值模拟系统简介

本文的模型基于统计损伤力学理论^[9]和 Biot 经典渗流力学理论^[10],从细观角度建立了岩体渗流-应力-损伤耦合模型(FSD Model),开发出岩石破裂过程渗流-应力耦合分析系统,这个系统能够对非均匀材料裂纹的萌生、扩展过程中渗透率演化规律及其渗流-应力-损伤耦合机制进行模拟分析。

对渗流中流固耦合问题,除了基本的渗流耦合方程外,还要增加渗流-应力关系方程:

$$k(\sigma, p) = \xi k_0 e^{-\beta(\sigma_{ii}/3 - \alpha p)} \quad (1)$$

式中 P 为孔隙水压力; k_0 为零应力下的渗透系数; β 为耦合系数; σ_{ii} 为平均应力; α 为孔隙水压力系数。当单元的应力达到 Mohr-Coulomb 强度或抗拉强度时,单元的弹性模量按具有残余强度的脆性破坏本构方程进行刚度弱化处理,同时渗透系数按式(1)相应地增加, ξ 渗透率突跳系数,单元分离时模拟裂纹生成, $\xi=100$,单元接触时模拟裂纹闭合, $\xi=0.01$ 。可由试验确定^[11-13]。

在 RFPA^{2D}-Flow 系统中,应用有限元技术进行渗流和应力计算,针对介质的非均匀性,把模型离散为不同参数分布的细观单元。仿真计算过程是准静态的,在每一步加载过程中,模型计算出一个渗流-应力耦合迭代结果,并按最大拉应变准则和 Mohr-Coulomb 准则对单元进行损伤判断,对损伤单元的力学行为用弹性损伤方程描述,损伤单元具有残余强度,它的弹性模量会损伤减少,渗透率则会增加,水压力就可以跟踪传递到损伤单元四周的非损伤单元。然后重新进行应力计算,导致压力调整和再分配,直到一个新的应力平衡。这样,细观损伤演化和宏观裂纹产生过程中渗透性质的演化进程就可进行。

2 数值模拟结果和讨论

2.1 数值模型

根据开滦矿务局范各庄煤矿的地质条件,12 煤底板突水模型沿走向长度为 300 m,高 200 m,整个

模型由泥岩、12 煤、含水砂岩层、隔水泥岩层、奥陶系灰岩层组成。其中含水砂岩层内含有平均压力为 2 MPa 的承压水,奥陶系灰岩层含有 9 MPa 的高压水,其余各层都是不同厚度的隔水泥岩。砂岩层含水量不大;对 12 煤层安全开采构成潜在威胁的是奥陶系灰岩内的高压水。12 煤的平均厚度为 3.54 m。通过分布开挖来模拟采动影响,模型如图 1。

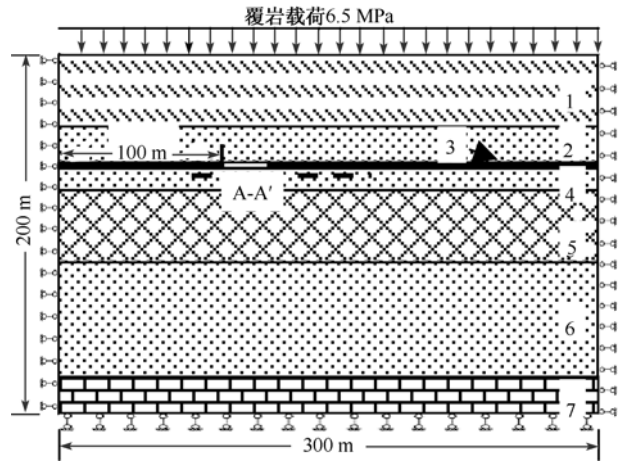


图 1 12 煤底板数值计算模型
Fig. 1 Numerical model for simulation
注: 1—6 为岩层层组序号。

模型划分成 300×200 共 60 000 个单元,受模型计算容量所限,在模型顶部加 6.5 MPa 的载荷来等效上部 400 m 的岩层。岩体只承受自重应力和水压力。边界条件为:两端水平约束,可以垂直移动,底端固定,四周隔水;含水砂岩中含有 2 MPa 的水压;奥陶系灰岩层含有 9 MPa 的水压。通过分步开挖来模拟底板突水过程:模拟计算沿走向自左侧 100 m 处开始开挖,每一步 25 m。为了简化网格划分,充分体现各层之间的力学性质的差异,将岩性、力学性质和分布厚度相近或相同的岩层划归一个层组,简化合并后为 7 个层组,详细的地层计算参数见表 1。

2.2 结果分析及讨论

模拟过程中的开挖是分布进行的,共进行了四步开挖。图 2 中 step 3-7 中“3”表示开挖第二步,总体计算中的第 3 步(第一步计算没有开挖时的应力场),

表 1 突水模型参数及数值
Table 1 Mechanical parameters and sizes of water inrush model

序号	岩性	厚度/m	弹模/MPa	抗压强度/MPa	泊松比	容重/kg·m ⁻³	渗透系数/m·d ⁻¹	孔隙水压力系数	均质度
1	覆盖层	40	20 000	60	0.30	2 300	0.01	0.01	20
2	隔水泥岩	20	18 000	35	0.27	2 630	0.01	0.01	2
3	12 煤	3	16 000	25	0.30	1 520	0.01	0.01	10
4	隔水泥岩	12	18 000	35	0.27	2 630	0.01	0.01	2
5	含水砂岩	40	36 000	100	0.15	2 610	10	1.00	4
6	隔水泥岩	65	18 000	35	0.27	2 630	0.01	0.01	2
7	奥陶灰岩	20	30 000	100	0.17	3 000	10	1.00	20

“7”表示开挖中引起岩层渐进破坏的步数;损伤区中白色为压剪破坏区,深色为拉伸破坏区。底板突水的发生、发展过程分析如下:

a. 当采场工作面推进到 25 m(step 2, 第一步开挖), 引起采空区围岩应力的重新分布, 在开挖区域两侧, 前后方煤壁支撑处出现应力集中(图 2), 最大主应力 11.2 MPa, 见图 3。从损伤分布可以看出(图 2), 开挖处煤壁两端出现拉剪破坏, 开挖区域顶底板围岩也出现部分拉剪破坏区, 破坏区深度只有 5 m 左右, 顶底板围岩依旧保持稳定。采空区中部底板岩层发生微弱底鼓现象, 最大鼓胀位移 8 mm, 见图 4。

b. 当工作面推进到 50 m 时(step3, 第二步开挖), 在采空区支撑煤壁处最大主应力为 18.8 MPa, 顶板的破坏深度为 3 m 左右, 采空区底板的破坏深度已经加深为 12 m 左右。在水压和矿压共同作用下, 开挖区 26 m 处最先出现底板岩层拉剪破坏, 随着隔水泥岩层向上弯曲鼓胀加剧, 在开挖区两端的煤壁处产生压剪破坏区, 同时在开挖区中间形成拉破坏区, 出现岩层离层现象; 该破坏区与含水砂岩层贯通, 形成突水通道, 出现涌水。图 4 采空区底板位移曲线图和图 5 流量变化曲线清楚地指示出底板突水的准确位置。此时底板最大垂直位移为 757 mm。

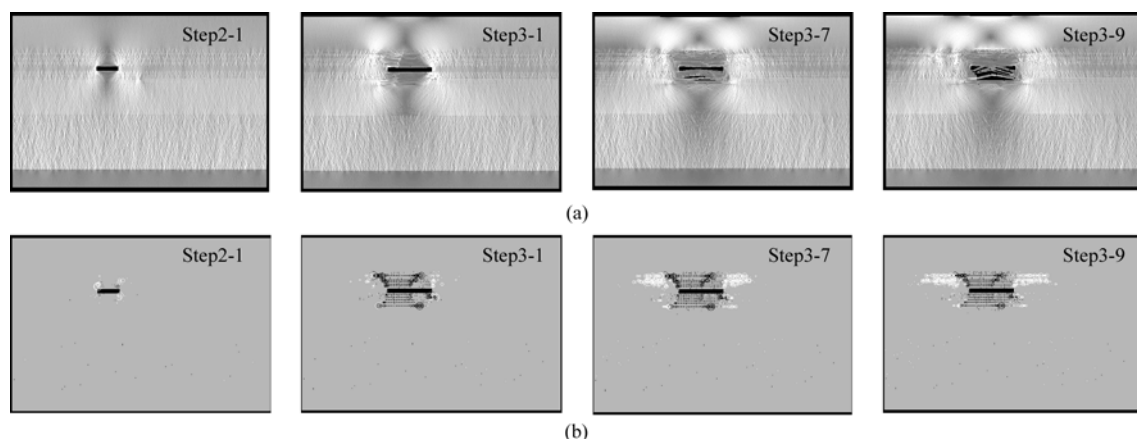


图 2 底板突水通道形成及突水过程图

Fig. 2 Numerical results of inrush pathway formation and inrush process of groundwater

a——剪应力场; b——损伤场

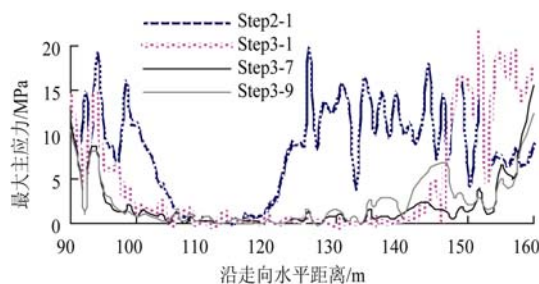


图 3 底板沿 A-A'剖面最大主应力曲线

Fig. 3 The curves of major principal stress along the section A-A'

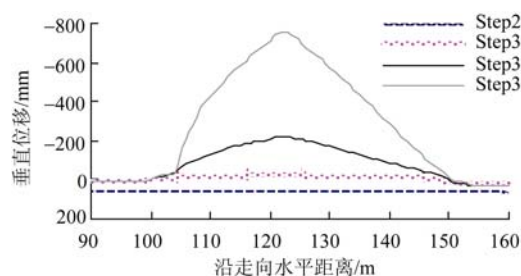


图 4 沿 A-A'剖面底板垂直位移曲线

Fig. 4 The curves of vertical displacement along the section A-A'

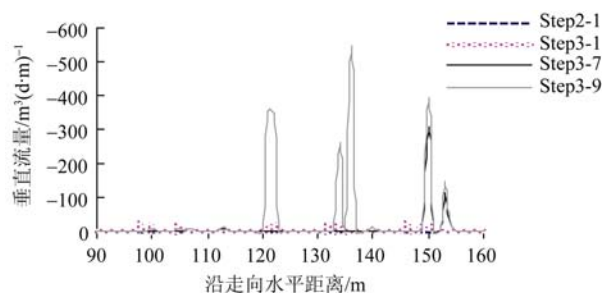


图 5 底板沿 A-A'剖面垂直流量曲线

Fig. 5 The curves of fluid flow along the section A-A'

当回采工作面推进到 75 m 时(step 4, 第三步开挖), 水压力逐渐下降, 突水通道没有继续向下发展, 只是和含水砂岩完全贯通。数值模拟表明, 采动引起的 12 煤层的两端煤柱出现应力集中, 底板隔水泥岩层率先在 26 m 处发生拉伸破坏, 破坏区继续向下发展出现少量的涌水; 在水压力和地应力的共同作用下, 在该处最薄弱的地方底板破坏迅速向下扩展, 12 煤与含水砂岩之间的隔水泥岩依次发生破坏直至贯通, 最终含水砂岩中的水通过隔水泥岩中的破坏

带进入采空区；突水量随着破坏深度的增加而相应增大。由于含水砂岩层中的水量较小，同时破坏带没有和水压、水量较为巨大的奥陶系灰岩相贯通，对矿井不会产生灾难性的突水事故，反之，当它们与奥陶灰岩巨厚含水层存在连通性的陷落柱或导水断层时，奥陶系灰岩层中的水将沿着陷落柱或导水断层对含水砂岩进行补给或直接进入采空区，这时将会产生灾难性的突水事故。其中 1984 年 6 月 2 日 10 点 20 分，2171 综采工作面发生的重大突水事故就是由于奥陶灰岩强含水层承压水经陷落柱溃入矿井，造成的重大灾难。由此可见，在开采期间，加强对含水砂岩层水量、水压的监测，对于 12 煤底板突水的防治和预测预报至关重要。

3 12 煤层底板其他工况突水仿真计算

根据范各庄实际地质条件和多年生产积累的经验^[14]，提出了 12 煤底板泥岩隔水层的突水系数，对于完整底板泥岩层的临界突水系数为 0.157 MPa/m，据此得出含水砂岩层的临界突水水压为 1.8 MPa，因此，为了更好地对比各种不同工况的突水情况，另取两种工况进行仿真计算。

3.1 12 煤层底板含水砂岩水压 1.7 MPa

当开采工作面推进到 25 m 时，开挖区域两侧出现应力集中，从损伤分布可以看出(图 6)，开挖区域上下围岩的损伤区范围较之 2 MPa 工况时有明显的减小，尤其是底板破坏深度仅 2 m 左右，底板没有发生明显鼓胀(图 7)，只是顶板由于受到上层覆岩载荷作用产生部分损伤破坏区。

当开采工作面推进到 50 m 时，由于含水砂岩层水压较小，较之 2 MPa 工况时底板的破坏区范围减

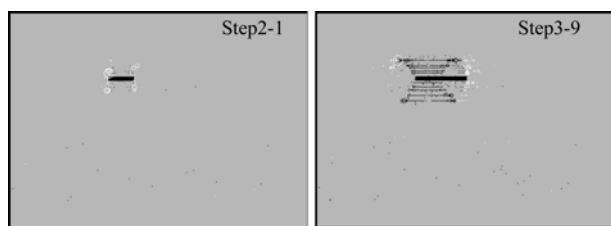


图 6 底板损伤区分布图

Fig. 6 The distribution of damaged area

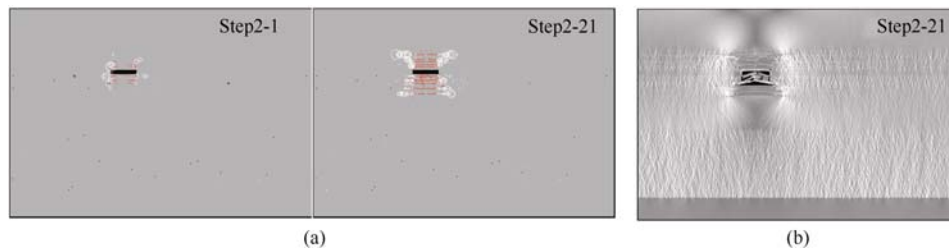


图 9 底板突水过程图

Fig. 9 The process of groundwater inrush

a——损伤区分布；b——剪应力分布

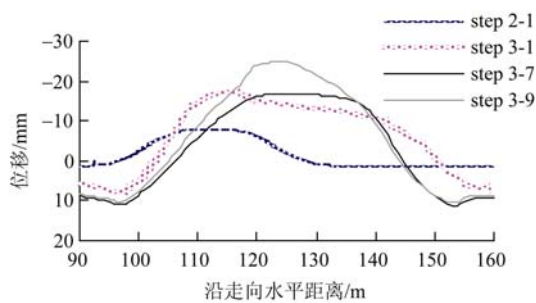


图 7 沿 A-A'剖面底板岩层垂直位移曲线

Fig. 7 The cures of vertical displacement along the section A-A'

小，底板没有出现明显鼓胀现象，底板最大鼓胀位移仅 20 mm 左右(图 7)，而由于上覆载荷作用顶板已经发生破坏，应力得到一定程度的释放，底板破坏得到缓解，因此未达到突水；顶板的破坏高度达 15 m 左右，出现破碎冒落区(图 6)，岩层离层。

3.2 12 煤层底板含水砂岩水压 3 MPa

当开采工作面推进到 25 m 时，由于含水砂岩层的水压为 3 MPa，在水压和矿压的共同作用下，顶、底板出现了大面积的损伤破坏区域，比同样开挖进度水压为 2 MPa 时，损伤破坏区扩大了近一倍。顶底板的破坏区均达到了 16 m 左右。在开挖区底板中间形成拉应力破坏区，岩层离层破坏，底板出现了严重的鼓胀现象，底板最大垂直位移为 2 500 mm(图 8)。底板破坏区与含水砂岩层完全贯通出现突水(图 9)。

4 结 论

a. 当含水砂岩层水压小于 1.8 MPa 时，顶板率

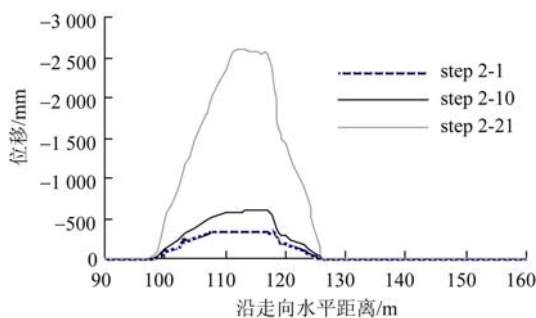


图 8 沿 A-A'剖面底板垂直位移曲线

Fig. 8 The curves of vertical displacement along the section A-A'

先出现垮塌, 应力得到释放, 底板不会发生突水灾害, 当含水砂岩层水压达到或超过 2 MPa 时, 12 煤底板在不同的开挖阶段发生底板破坏突水。

b. 突水后底板突水通道处的位移和流量都发生突变, 底板出现严重的鼓胀现象。随着拉剪破坏区的形成, 底板破坏深度急剧增加, 造成整个底板隔水泥岩的破坏与含水砂岩层贯通, 由于含水砂岩层与奥陶灰岩中间仍有一层厚度大的隔水泥岩保护, 破坏区没有与奥陶系灰岩贯通, 如果没有陷落柱或断层连通时不会产生灾难性突发涌水事故。因此, 在开采期间, 加强对含水砂岩水量、水压的监测, 对于 12 煤底板突水的防治和预测预报至关重要。

参考文献

[1] 施龙青, 韩进. 底板突水机制及预测预报[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2004.

[2] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.

[3] 彭苏萍, 王金安. 承压水体上安全采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.

[4] 王作宇, 刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.

[5] 仵彦卿, 张倬元. 岩体力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.

[6] 杨天鸿, 唐春安, 刘红元, 等. 承压水底板突水失稳过程的数值模型初探[J]. 地质力学学报, 2003, 9(3): 281-288.

[7] 王连国, 宋扬. 煤层底板突水突变模型[J]. 工程地质学报, 2002, 8(2): 160-163.

[8] 钟亚平. 开滦煤矿防治水综合技术研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.

[9] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34(2): 249-261.

[10] SOULEY M, HOMAND F, PEPA S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38: 297-310.

[11] LI S P, WU D X. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of Yinzhuang sandstone[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34(3/4): 435-441.

[12] YANG T H, TANG C A, LIANG Z Z. Study on model of damage and flow coupling in brittle rock failure process[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(5): 533-541.

[13] ZHU W L, WONG T F. Network modeling of the evolution of permeability and dilatancy in compact rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B2): 2963-2971.

[14] 孟召平, 易武, 兰华, 等. 开滦范各庄井田突水特征及煤层底板突水地质条件分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 1-9.

(上接第 26 页)

表 5 为地质状况相近的两口井产气量对比情况。从数据对比可以看出, 清洁压裂液井(L6)的产气量远大于清水压裂井(H6), 而且清洁压裂液井产气量增长速度快, 从机理上分析, 其有效时间也比清水压裂井长, 这有待今后几年里累计产气量情况来验证。

表 5 不同压裂液井产气量对比 10^3 m^3
Table 5 Gas production of different fracturing fluids

月份	L6(清洁压裂液井)	H6(清水压裂井)
7	11.7	5.4
8	24.0	6.3
9	29.6	10.5
10	30.0	13.8
11	29.4	16.2
12	30.6	16.5

注: L6、H6 井于 2008 年 7 月开始收集煤层气, 表 5 中统计年份为 2008 年。

4 结 论

a. VES-18 清洁压裂液无水不溶物, 无需加入粘土稳定剂、防腐剂和助排剂等一系列助剂, 对储层几乎无二次伤害。

b. 该压裂液具有很好的耐低温性和时间稳定性, 但抗高温能力有一定的局限性。

c. 该压裂液具有低粘度、高弹性特点, 携砂性能强。

d. 该压裂液具有剪切稀释特性和结构的自动恢复性, 耐剪切性好。

e. 该压裂液破胶效果好, 易返排, 无残渣, 与地层配伍性良好。

参考文献

[1] 张文宗, 庄照锋, 孙良田, 等. 中高温清洁压裂液在卫 11—53 井的应用研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 110-112.

[2] 吴琼, 苏志鹏, 尚岩, 等. FPF 清洁无聚携砂液的研制与应用[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(3): 55-56.

[3] 孙彦波, 赵贤俊, 于克利, 等. 清洁压裂液及其在大庆油田的应用[J]. 化学工程师, 2007, 142(7): 49-52.

[4] 王维明, 郭丽梅. 清洁压裂液性能与破胶研究[J]. 精细石油化工, 2007, 6(25): 4-7.

[5] 黄霞, 郭丽梅, 姚培正, 等. 煤层气井清洁压裂液破胶剂的筛选[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 2(37): 26-28.

[6] 卢拥军, 方波, 房鼎业, 等. 粘弹性胶束压裂液的形成与流变性质[J]. 油田化学, 2003, 20(4): 325-330.

[7] 郭丽梅, 陈利红, 武首香, 等. 粘弹性表面活性剂的流变性质[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(3): 89-92.

[8] 胡忠前, 马喜平, 王红, 等. 粘弹性蠕虫状胶束及其应用[J]. 高分子通报, 2007(8): 24-27.