

# 煤层气钻探低密度钻井液物/化协同降滤失研究

朱金勇<sup>1</sup> 侯淑鹏<sup>1</sup> 陈礼仪<sup>1</sup> 王 胜<sup>1</sup> 邹 杰<sup>2</sup> 宋佳奇<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 四川 成都 610059; 2. 四川省川建勘察设计院 四川 成都 610017;  
3. 四川西南交大土木工程设计有限公司 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对低压力系数孔隙裂隙煤岩储气层钻进过程中的储层损害及孔壁不稳定问题,采用微观分析和试验研究相结合的方法,开展了拥有物/化协同降滤失性能的钻井液体系的研制。分别对由超细惰性材料、化学添加剂配制的钻井液进行API失水试验,并采用扫描电镜分析手段对所形成的泥皮进行微观形貌分析。通过正交试验研制出拥有物/化协同降滤失性能的钻井液优化配方,采用扫描电镜分析手段对其泥皮进行微观形貌分析及性能评价。通过API试验、扫描电镜分析得到了空心玻璃微珠颗粒在泥皮中搭桥形成微米级孔隙发育的空间结构,使基浆滤失量增加;纳米二氧化硅在泥皮中形成的空间结构松散,孔隙率大,导致滤失量随纳米二氧化硅剂量的增加由24 mL迅速增加至50 mL。而降滤失剂泥皮光滑致密,能使基浆滤失量由24 mL降低至10 mL左右。最终通过正交试验优化了含超细惰性材料的钻井液配方。研究结果对于揭示超细惰性材料与黏土矿物及降滤失剂的相互作用机理以及低压力系数孔隙裂隙煤岩储气层的快速钻进具有重要意义。

**关键词:** 降滤失; 空心玻璃微珠; 纳米二氧化硅; 低压力系数; 孔隙裂隙煤岩储气层

中图分类号: TE254 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)09-0122-05

## Study on physical and chemical coordinative depressing filter loss of low density drilling fluid for coalbed methane drilling exploration

Zhu Jinyong<sup>1</sup> ,Hou Shupeng<sup>1</sup> ,Chen Liyi<sup>1</sup> ,Wang Sheng<sup>1</sup> ,Zou Jie<sup>2</sup> ,Song Jiaqi<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;  
2. Sichuan Chuanjian Geotechnical Survey and Design Institute, Chengdu 610017, China; 3. Civil Engineering and Design Company Limited of Sichuan Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** According to the problem of the reservoir failure and the borehole wall instability occurred in the drilling process of the pore and crack coal and rock gas reservoir with low pressure coefficient, a micro-analysis and the experiment study combined method was applied to conduct the research and development on the drilling fluid system with the physical and chemical coordinative depressing filter loss performances. An API water loss test was conducted on the drilling fluid prepared with the ultra-fine inert materials and chemical additives and the means of the scanning electron microscopy analysis were applied to the morphology analysis on the mud cakes formed. The drilling fluid optimized formulation with the physical and chemical coordinative depressing filter loss performances was researched and developed with orthogonal experiment. The means of the scanning electron microscopy analysis were applied to the morphology analysis and the performance evaluation on the mud cakes. API experiment and scanning electron microscopy analysis revealed that hollow glass microsphere increased the filter loss of basic mud, due to its particles forming a space structure with developed micron pores by bridging in the mud cake. The filter loss rapidly increased from 24 mL to 50 mL with the increasing of nano-silica doses, due to nano-silica forming a loose spatial structure, which had the big porosity. However, the filter loss of filtrate reducers decreased from 24 mL to 10 mL by forming a

收稿日期: 2016-05-17; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.09.022

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272331, 51204027); 中国地质调查局资助项目(12120113017300); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室资助项目(SKLGP2012Z007)

作者简介: 朱金勇(1991—),男,四川绵阳人,硕士研究生。通讯作者: 陈礼仪 教授,博士生导师, E-mail: cly@cdut.edu.cn

引用格式: 朱金勇,侯淑鹏,陈礼仪,等.煤层气钻探低密度钻井液物/化协同降滤失研究[J].煤炭科学技术 2016 A4(9): 122-126,160.

Zhu Jinyong, Hou Shupeng, Chen Liyi, et al. Study on physical and chemical coordinative depressing filter loss of low density drilling fluid for coalbed methane drilling exploration [J]. Coal Science and Technology, 2016, A4(9): 122-126,160.

smooth and compact mud cake. Finally, the drilling fluid formulation with ultrafine inert material was optimized by orthogonal test. The study achievements would have important significances to reveal the interaction mechanism between the ultra fine inert material and the clay mineral and the filtrate reducer and to the rapid drilling of the coal and rock reservoir with low pressure coefficient pore and cracks.

**Key words:** depressing filter loss; hollow glass microspheres; nano-silica; low pressure coefficient; pore and crack coal and rock reservoir

## 0 引言

煤层气是一种清洁的新型非常规天然气,据国土资源部新一轮全国油气资源评价成果,我国地下2 000 m以内煤层气资源量为36.81万亿m<sup>3</sup>,位列世界前三。开发利用丰富的煤层气不仅能提高煤矿区的安全性,保护环境,而且对改善我国能源结构,促进清洁能源发展具有重大意义<sup>[1-2]</sup>。

随着煤层气进一步开发,大量的低压力系数的煤岩储气层钻进问题亟待解决<sup>[3-4]</sup>。这些储气层的勘探开发难度大,对钻井液密度要求苛刻<sup>[5-9]</sup>。而且与一般煤岩相比,微裂隙发育是储气层煤岩的主要物理特征<sup>[10-12]</sup>。而对于这样一类较软的孔隙裂隙煤岩储气层,钻井液失水严重,不仅提高了钻进成本,也污染了储气层<sup>[13-14]</sup>。目前,国内外学者对煤层气钻探工艺做了大量的研究。如赖晓晴等<sup>[15]</sup>研究了我国煤层气开发钻井液技术应用现状与发展思路,韩宝山<sup>[16]</sup>研究了欠平衡钻井技术与煤层气开发,郑力会等<sup>[17]</sup>对绒囊钻井液控制煤层气储层伤害进行了室内研究。左景来等<sup>[5]</sup>研究了适用于煤层气开采的低密度钻井液技术。Clarkson等<sup>[18]</sup>通过研究指出煤岩储层比其他储层更易受到渗透率敏感性损害。而在钻井液中引入超细惰性材料,并与化学类抑制剂进行协同降滤失方面缺少系统深入的研究。

鉴于此,笔者以煤系地层的结构特征分析为基础,结合煤层气储层对钻井液的性能要求,分别对空心玻璃微珠(HGM)、纳米二氧化硅、1:1复配SMC-SMP、改性沥青(SAS)等4种添加剂进行较为系统的试验研究,通过正交试验研制出了适用于煤层气钻探的低密度钻井液体系,对其降滤失性能及流变性能进行了评价,并从微观上分析了该体系的降滤失机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料与仪器

试验使用的材料主要有:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(化学纯)、磺化褐煤(SMC)、磺甲基酚醛树脂(SMP)、高分子链多糖聚合物黄原胶(XC)、SAS、钠基膨润土、HGM、

纳米二氧化硅。

试验使用的仪器主要有:JSM-5900LV型扫描电子显微镜、ZNN-D6型六速旋转黏度计、JB50-D增力电动搅拌机、YMS 0.01-7.0型数显液体密度计、MLN-1A型漏斗黏度计、苏式1009型泥浆失水仪、秒表、烧杯、天平等。

### 1.2 试验方法

1) 物理封堵性能评价。在配制好的基浆中分别加入不同剂量的HGM、纳米二氧化硅,搅拌30 min后,测试其API滤失量,并通过商业数学软件MatlabIn8.0进行试验数据的统计与分析,得出不同超细惰性材料的滤失量随其剂量的变化曲线,以表征该添加剂对基浆滤失性能的影响。再通过扫描电子显微镜对所得泥皮进行微观形貌分析。

2) 化学抑制性能评价。在前期研究的基础上,筛选出降滤失性能较好的添加剂SMC-SMP、SAS,分别取不同剂量加入基浆中搅拌30 min,测试其API滤失量,并通过MatlabIn8.0进行数据统计及泥皮微观形貌分析。

3) 优化配方及其综合性能评价。将筛选出的添加剂进行正交试验,提取出优化配方,对优化配方配制出的钻井液的黏度、失水等一系列综合性能进行测试分析。

## 2 试验结果与讨论

煤岩储气层地层复杂多变,主要表现在各向异性和结构构造的不连续性,故在煤岩储气层的钻进过程中事故频发。究其原因,是煤岩储气层在沉积过程中形成的层状构造和孔隙结构所致。部分地层煤岩微观形貌呈鱼鳞状,胶结强度差,微细孔隙发育。且煤岩多与泥页岩互层,泥页岩层有较强的水化膨胀性,在其遇水膨胀过程中,对邻层煤岩施加相应的挤压力,导致破碎的煤岩层剥落掉块甚至引发孔壁垮塌。由此可知,提升煤岩储气层钻进过程中钻井液的封堵抑制性能非常重要。

### 2.1 超细惰性材料物理封堵性能

为研究低密度钻井液中超细惰性材料对滤失量的影响,如图1所示。分别测试了不同剂量的纳米

二氧化硅、HGM 在基浆中的滤失量,测试结果如图 1 所示。由图 1 可知,仅由这 2 种超细材料与膨润土配置成的钻井液,滤失量随超细材料的增加而急剧上升。纳米二氧化硅较 HGM 对滤失量的影响更为敏感,质量分数 5% 纳米二氧化硅可使基浆的滤失量达到 48.6 mL,而达到相同滤失量所需的 HGM 的质量分数为 15%。

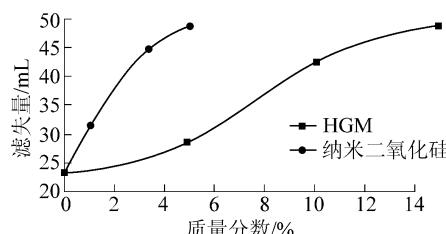


图 1 钻井液滤失量随超细材料剂量的变化曲线

Fig. 1 Changing curves of filter loss of drilling fluid with different doses of ultra-fine materials

为了从微观角度分析以上试验结果,分别对 15% 的 HGM 钻井液及 3% 的纳米二氧化硅钻井液的泥皮进行扫描电镜分析,分析结果如图 2 所示。图 2a 中,HGM 大部分颗粒粒径在 10~200 μm 颗粒级配较差,微结构呈圆球形,互相堆积填充形成的 HGM 骨架微米级孔隙较发育。而基浆中钠基膨润土的黏土矿物主要为蒙脱石,蒙脱石颗粒负电性较强,易吸附于 HGM 表面,形成蒙脱石吸附层<sup>[19]</sup>。该吸附层呈片状及鱼鳞状在 HGM 表面分布均匀,可通过静电作用抑制 HGM 在基浆中的吸附团聚,然而却难以填充封堵 HGM 微米级孔隙。如图 2b 所示,纳米二氧化硅大部分颗粒粒径为 1~100 nm,微结构为球形,呈絮状和网状的准颗粒结构。呈灰黑色片状、鱼鳞状的蒙脱石被大量团絮状的白色二氧化硅颗粒包裹,致使蒙脱石颗粒之间胶结质量差,堆积松散。

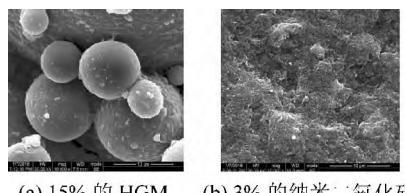


图 2 HGM 及纳米二氧化硅钻井液泥皮的 SEM 结果

Fig. 2 SEM results of mud cake of drilling fluid added HGM and nano-silica

在钻进过程中,超细材料颗粒粒径稍小于煤储层孔裂隙间隙时,颗粒可进入孔裂隙将其堵塞,从而达到降滤失的效果。但自然状态下的孔裂隙较复杂,当颗粒粒径远小于煤储层孔裂隙间隙时,颗粒之

间相互搭桥,形成超细材料骨架结构,而同种类超细材料级配较差,致骨架结构孔隙发育,故超细材料在地层中有一定的降滤失效果,但并不理想。因此,笔者将超细材料与钻井液常用添加剂进行复配,从而将颗粒骨架结构孔隙封闭。而钻井液 API 失水试验所得泥皮,正好能模拟该骨架结构。

超细颗粒较少时,骨架结构孔隙完全被蒙脱石颗粒填塞,随着超细颗粒比例增加,大部分蒙脱石颗粒吸附于超细颗粒表面,用于填塞骨架结构孔隙的超细颗粒减少,孔隙量增加,导致失水量增加。

## 2.2 降滤失剂化学抑制性能

为形成致密泥皮,需选择合适的钻井液添加剂与超细材料进行复配。而目前,降滤失剂品种繁多,笔者仅选用两大类具有代表性的降滤失剂进行讨论。其中,腐植酸类降滤失剂 SMC-SMP 主要通过多种官能团的吸附作用,形成空间高分子结构网,使泥皮更加致密。而沥青类抑制剂 SAS,其不溶于水的部分有一定的塑性,在井内正压差的作用下可被挤入颗粒骨架结构孔隙中,起到封堵降滤失作用。

分别测试了不同剂量的 SMC-SMP、SAS 对基浆滤失量的影响,如图 3 所示。随着 SAS 剂量增加,钻井液失水量降低,但曲线较平缓。而加入 SMC-SMP 后,曲线较陡,滤失量急剧下降。当其剂量为 1% 时,滤失量降至 10.8 mL,继续添加,对钻井液的滤失量影响较小。故 SMC-SMP 降滤失性能更佳。

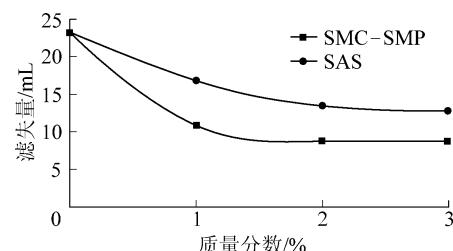


图 3 钻井液滤失量随 SMC-SMP、SAS 剂量的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of filter loss of drilling fluid with different doses of SMC-SMP and SAS

为了从微观角度分析以上试验结果,对降滤失性能优越的 SMC-SMP 钻井液的泥皮进行扫描电镜分析,如图 4 所示。在基浆中加入 SMC-SMP 后,泥皮薄而致密,放大 5 000 倍后,可见泥皮表面光滑,呈厚层状,水分子不易通过,然而仍然存在少量微米级孔道。SMC 通过水化基团使黏粒表面上形成吸附溶剂化水膜,同时提高了黏粒的  $\zeta$  电位,因而不仅增强了黏粒聚结的机械阻力和静电斥力,而且提高

了黏粒的聚结稳定性,形成致密的泥饼,从而降低滤失量。此外,黏土颗粒上的吸附溶剂化水膜具有堵孔作用,使泥饼更加致密; SMP 分子结构主要以苯环、亚甲基桥和 C-S 键组成,分子链上有吸附基团,能利用氢键吸附酚羟基与黏粒表面上的氧。它的亲水性和抗盐析能力均强,受高温影响小。当 SMP 与 SMC 复配使用时,SMP 在黏土表面的吸附量可增加 5~6 倍,从而使黏土颗粒表面的  $\zeta$  电位明显增大,水化膜明显增厚,最终导致处理剂护胶能力增强,泥饼质量得以改善<sup>[20]</sup>。

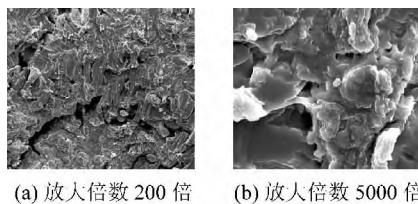


图 4 SMC-SMP 钻井液泥皮的 SEM 结果

Fig. 4 SEM results of mud cake of drilling fluid added SMC-SMP

### 2.3 低密度钻井液的优化配方与性能

在前期研究的基础上,并通过滤失量试验,筛选出 SMC、SMP 按 1:1 复配作为主要的降滤失剂; HGM 是硼硅酸盐微米材料,其优点是密度小、化学稳定性好、抗压强度高,能有效降低钻井液密度。故

选用 HGM 作为低密度钻井液的减重剂,同时作为微米级孔喉封堵剂;选用 XC 作为流型调节剂。通过室内正交试验(表 1)。得到低密度钻井液体系优化配方 1 号为: 清水+5% 钠基膨润土+0.3% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+5% HGM+0.2% XC+3% SMC+3% SMP; 将纳米二氧化硅与 HGM 复配作为超细孔喉封堵剂,得到优化配方 2 号为: 清水+5% 钠基膨润土+0.3% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+5% HGM+1% 纳米二氧化硅+0.1% XC+3% SMC+3% SMP。

表 1 钻井液正交试验因素水平表

Table 1 Orthogonal factor level table of drilling fluid

| 试验编号 | 因素      |          |             |
|------|---------|----------|-------------|
|      | A( HGM) | B( XC)   | C( SMC-SMP) |
| 1    | 1( 5%)  | 1( 0.1%) | 1( 2%)      |
| 2    | 1( 5%)  | 2( 0.2%) | 2( 3%)      |
| 3    | 1( 5%)  | 3( 0.3%) | 3( 4%)      |
| 4    | 2( 10%) | 1( 0.1%) | 2( 3%)      |
| 5    | 2( 10%) | 2( 0.2%) | 3( 4%)      |
| 6    | 2( 10%) | 3( 0.3%) | 1( 2%)      |
| 7    | 3( 15%) | 1( 0.1%) | 3( 4%)      |
| 8    | 3( 15%) | 2( 0.2%) | 1( 2%)      |
| 9    | 3( 15%) | 3( 0.3%) | 2( 3%)      |

注:括号中的量为添加剂质量分数。

对 2 种配方钻井液体系进行综合性能测试,低密度钻井液主要流变性能与失水性能见表 2。

表 2 低密度钻井液主要流变性能与失水性能

Table 2 Main rheological properties and filtration property of low-density drilling fluid

| 优化配方 | 漏斗黏度/s | 表观黏度/(mPa·s) | 塑性黏度/(mPa·s) | 动切力/Pa | 动塑比   | 失水量/mL | 泥皮厚度/mm | pH  |
|------|--------|--------------|--------------|--------|-------|--------|---------|-----|
| 1 号  | 35.5   | 20.5         | 15           | 5.5    | 0.370 | 4      | 1.6     | 7.5 |
| 2 号  | 61.0   | 32.5         | 21           | 11.5   | 0.548 | 10     | 3.6     | 7.5 |

优化配方的密度为 0.93 g/cm<sup>3</sup>,属低密度钻井液,采用该类钻井液可降低液柱压力,缩小液柱与低压储层之间的压差。这种适当的卸压行为,不仅能保护油气层,而且能有效改造低渗透性油气层,提高开采率。压差过大时,若液柱压力过大,则失水严重;若地层压力过大,则易缩径垮塌。故该体系钻井液可适用于压力系数为 0.80~1.04 的地层,且应根据现场具体情况适量增减 HGM 剂量。比较优化配方 1、2 号可知,要使钻井液获得相同的流动速率,优化配方 2 号需要更大的剪切应力,其失水量及泥皮厚度均是优化配方 1 号的 2 倍以上,且其泥皮较为松散,如图 5a 所示。

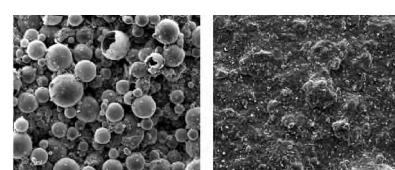


图 5 优化配方的钻井液泥皮的 SEM 结果

Fig. 5 SEM results of mud cakes of drilling fluid of optimize formulas

说明钻井液体系对于二氧化硅的敏感程度相当强烈。而优化配方 1 号流变性能较为理想。且该配方的失水量低于 SMC-SMP 钻井液,约 4 mL。泥皮厚度 1.6 mm,润滑性能良好,其微观形貌如图 5b 所

示。通过超细惰性材料搭建骨架,降滤失剂 SMC-SMP、钠基膨润土及流行调节剂 XC 协同填充骨架孔隙,从而形成表面光滑致密、微米级空隙极少的泥皮。

### 3 结 论

1) 超细材料 HGM 与纳米二氧化硅粉末可有效封堵煤岩孔裂隙,但由其所形成的超细材料骨架结构及泥皮透水性较强,需与化学类降滤失剂 SMC、SMP 复配使用。

2) 在孔隙、裂隙发育的煤岩储气层的钻进过程中,超细材料 HGM 与纳米二氧化硅可在微裂隙处搭桥,协助降滤失剂进行彻底封堵。

3) 结合微观、宏观试验研究与理论分析,研制了一种含超细惰性材料、适用于低压力系数的孔隙裂隙煤岩储气层的低密度钻井液体系,其配方为:清水+5% 钠基膨润土+0.3% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+5% HGM+0.2% XC+3% SMC+3% SMP。

### 参考文献( References) :

- [1] 傅雪海,秦勇,韦重韬.煤层气地质学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [2] 孙茂远,刘贻军.中国煤层气产业新进展[J].天然气工业,2008,28(3):5~9.  
Sun Maoyuan, Liu Yijun. New progress in coalbed methane industry of China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 5~9.
- [3] 赵阳升,杨栋,胡耀青等.低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455~458.  
Zhao Yangsheng, Yang Dong, Hu Yaoqing, et al. Study on the effective technology way for mining methane in low permeability coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 455~458.
- [4] 张义,鲜保安,孙粉锦等.煤层气低产井低产原因及增产改造技术[J].天然气工业,2010,30(6):55~59.  
Zhang Yi, Xian Bao'an, Sun Fenjin, et al. Reason analysis and stimulation measures of low coal bed methane gas production wells [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 55~59.
- [5] 左景森,孙晗森,周卫东等.适用于煤层气开采的低密度钻井液技术研究与应用[J].煤炭学报,2012,37(5):815~819.  
Zuo Jinglun, Sun Hansen, Zhou Weidong, et al. Study and application of light weight drilling fluid applied to coalbed methane development [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 815~819.
- [6] 岳前升,陈军,邹来方等.沁水盆地基于储层保护的煤层气水平井钻井液的研究[J].煤炭学报,2012,37(S2):416~419.  
Yue Qiansheng, Chen Jun, Zou Laifang, et al. Research on coalbed methane drilling fluid for horizontal well based on coal reservoir protection in Qinshui basin [J]. Journal of China Coal, 2012, 37(S2): 416~419.
- [7] 岳前升,李贵州,李东贤等.基于煤层气水平井的可降解聚合物钻井液研制与应用[J].煤炭学报,2015,40(S2):425~429.  
Yue Qiansheng, Li Guichuan, Li Dongxian, et al. Development and application of degradable polymer drilling fluid for coal bed methane horizontal well [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 425~429.
- [8] 康毅力,陈德飞,李相臣等.煤层气钻采工作液对煤岩储层应力敏感性影响试验[J].煤田地质与勘探,2014,42(4):39~43.  
Kang Yili, Chen Defei, Li Xiangchen, et al. Influence of drilling fluid on stress sensitivity of coal bed reservoir [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(4): 39~43.
- [9] 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,2004,24(6):28~31.  
Liang Dachuan, Pu Xiaolin, Xu Xinghua. Particularity of coal collapse and drilling fluid countermeasure [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 24(6): 28~31.
- [10] 黄维安,邱正松,王彦祺等.煤层气储层损害机理与保护钻井液的研究[J].煤炭学报,2012,37(10):1717~1721.  
Huang Wei'an, Qiu Zhengsong, Wang Yanqi, et al. Study on damage mechanism and protection drilling fluid for coal bed methane [J]. Journal of China Coal, 2012, 37(10): 1717~1721.
- [11] 刘大锰,李振涛,蔡益栋.煤储层孔-裂隙非均质性及其地质影响因素研究进展[J].煤炭科学技术,2015,43(2):10~15.  
Liu Dameng, Li Zhentao, Cai Yidong. Study progress on pore-crack heterogeneity and geological influence factors of coal reservoir [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 10~15.
- [12] 邓少贵,李智强,陈华.煤层气储层裂隙阵列侧向测井响应数值模拟与分析[J].煤田地质与勘探,2010,38(3):55~60.  
Deng Shaogui, Li Zhiqiang, Chen Hua. The simulation and analysis of array lateral log response of fracture in coal bed methane reservoir [J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(3): 55~60.
- [13] 范翔宇,张千贵,艾巍等.煤岩储气层岩石蠕变特性与本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):3732~3739.  
Fan Xiangyu, Zhang Qiangui, Ai Wei, et al. Research on creep property and constitutive model of rock in coal bed gas reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 3732~3739.
- [14] 刘贻军,娄建青.中国煤层气储层特征及开发技术探讨[J].天然气工业,2004,24(1):68~71.  
Liu Yijun, Lou Jianqing. Study on reservoir characteristics and development technology of coal bed gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(1): 68~71.
- [15] 赖晓晴,楼一珊,屈沅治等.我国煤层气开发钻井液技术应用现状与发展思路[J].石油天然气学报,2009,31(5):326~328.

(下转第 160 页)

- 2007, 27(2): 236-239.
- [10] 余学义, 施文刚, 张平, 等. 黄土沟壑区地表移动变形特征分析[J]. 矿山测量, 2010(2): 38-40.  
Yu Xueyi, Shi Wengang, Zhang Ping, et al. Analysis of surface movement and deformation characteristics [J]. Mine Surveying, 2010(2): 38-40.
- [11] 李小磊, 白易彬. 采动影响下山区与平原地区地表移动规律比较[J]. 中州煤炭, 2011(7): 35-36, 43.  
Li Xiaolei, Bai Yibin. Comparison of surface displacement laws between mountainous area and plains under mining influence [J]. Zhongzhou Coal, 2011(7): 35-36, 43.
- [12] 康建荣, 何万龙, 胡海峰. 山区采动地表变形及坡体稳定性分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- [13] 康建荣. 山区采动裂隙对地表移动变形的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 59-64.  
Kang Jianrong. Analysis of effect of fissures caused by underground mining on ground movement and deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 59-64.
- [14] 戴华阳, 翟厥成, 胡友健. 山区地表移动的相似模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 501-504.  
Dai Huayang, Zhai Juecheng, Hu Youjian. Testing study on surface displacement of mountainous region with similar material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 501-504.
- [15] 李文秀, 杨少冲, 陈二忠, 等. 高陡山区开采自然坡失稳分析的神经网络方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 107-111.  
Li Wenxiu, Yang Shaochong, Chen Erzhong, et al. Neural network
- method of analysis of natural slope failure due to underground mining in mountainous areas [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 107-111.
- [16] 麻凤海, 施群德. 地表沉陷变形的非线性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(4): 15-18.  
Ma Fenghai, Shi Qunde. Study on non-linear of surface subsidence deformation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(4): 15-18.
- [17] 高富强, 王兴库. 岩体力学参数敏感性正交数值模拟试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 95-98.  
Gao Fuqiang, Wang Xingku. Orthogonal numerical simulation on sensitivity of rock mechanical parameters [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 95-98.
- [18] 查剑锋. 研究充填开采沉陷控制基础问题研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- [19] 王启春, 郭广礼, 查剑锋, 等. 厚松散层条件下研石充填开采地表移动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 42(2): 96-99, 103.  
Wang Qichun, Guo Guangli, Zha Jianfeng, et al. Study on surface ground movement law of coal rejects backfill minim under thick and loose overburden strata [J]. Coal Science and Technology, 2013, 42(2): 96-99, 103.
- [20] 丰晓灿, 郭延涛, 王有凯. 薄基岩浅埋深条件下地表移动变形规律数值模拟研究[J]. 中州煤炭, 2014(4): 92-95.  
Feng Xiaocan, Guo Yantao, Wang Youkai. Numerical simulation research on surface movement laws of mining shallow-buried coal seam under thin bedrock [J]. Zhongzhou Coal, 2014(4): 92-95.

(上接第126页)

- Lai Xiaoqing, Lou Yishan, Qu Ruanzhi, et al. Development and application status of drilling fluid technology for CBM development in China [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(5): 326-328.
- [16] 韩宝山. 欠平衡钻井技术与煤层气开发[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(4): 61-62.  
Han Baoshan. Under balance pressure drilling technology and coalbed gas development [J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(4): 61-62.
- [17] 郑力会, 孟尚志, 曹园, 等. 绒囊钻井液控制煤层气储层伤害室内研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 439-442.

Zheng Lihui, Meng Shangzhi, Cao Yuan, et al. Laboratory studies on control coal bed methane formation damage by fuzzy-ball based drilling fluids [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 439-442.

- [18] Clarkson C R, Jordan C L, Gierhart R, et al. Production data analysis of CBM wells [C] // Rocky Mountain Oil and Gas Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers. [s. l.]: [s. n.], 2007: 137-153.
- [19] 姜桂兰, 张培萍. 膨润土加工与工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 18.
- [20] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 230-231.