

## 煤层气水平井注氮增产改造技术

李贵川 张锦虎 邓拓 马成明 张奇 宋大伟

(中联煤层气有限责任公司 七元煤矿瓦斯治理与煤层气开发合作项目组 山西 寿阳 045400)

**摘要:** 针对七元煤矿低孔、低压、低含水饱和度、高变质程度的煤储层特点和筛管完井煤层气解吸困难情况,为了实现瓦斯治理与煤层气共同开发的需要,探索出一套煤层气水平井筛管完井下的注氮增产改造技术。利用顶替排液、氮气驱替、憋井放喷3种氮气改造模式的不同特点,实施多次“注氮-憋压-放喷”作业,通过注氮改造可以清除近井污染,沟通煤层割理裂隙,改善井筒远处煤层渗透率,建立单相气体渗流通道,实现煤层气高效开发的目的。结果表明:七元煤矿5组水平井实施注氮增产改造技术后,单井日产气量提高3~20倍,实现了单井产量的突破。

**关键词:** 煤层气开发; 瓦斯治理; 注氮增产; 煤层气水平井

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)05-0054-05

### Gas output improvement and reconstruction technology of coalbed methane horizontal well by nitrogen injection

Li Guichuan Zhang Jinhu Deng Tuo Ma Chengming Zhang Qi Song Dawei

(Gas Control and Coalbed Methane Development Cooperation Project Group of Qiyuan Mine, China United

Coalbed Methane Corporation Limited, Shouyang 045400, China)

**Abstract:** According to the seam reservoir features of the low porosity, low pressure, low water saturation and high metamorphic degree and the desorption difficult condition of coalbed methane in the screen pipe and completion in Qiyuan Mine, in order to realize the requirements of the gas control and coalbed methane joint development, a completed gas output improvement and reconstruction technology by nitrogen injection was discovered under the screen pipe and completion of the coalbed methane horizontal well. With the different features of the displaced drainage liquid, nitrogen displacement, suppressed well and blowout, three nitrogen reconstruction modes applied, multi nitrogen injection, pressure suppressed, blowout operations were conducted. With the nitrogen injection reconstruction, the pollution near the well could be cleaned, the seam cleat cracks could be linked up, the seam permeability far from the mine shaft was improved, a single phase gas seepage channel was established and the high efficient development target of the coalbed methane was realized. The results showed that after the gas output improvement and reconstruction technology of coalbed methane horizontal well by nitrogen injection in Qiyuan Mine was used, a daily gas production of a single well was improved by 3 ~ 20 times and a breakthrough of a single well production was realized.

**Key words:** coalbed methane development; gas control; gas output improvement by nitrogen injection; coalbed methane horizontal well

## 0 引言

随着我国经济社会的快速发展,能源需求量大幅增加,对煤层气、页岩气、致密砂岩气和天然气水合物等非常规天然气的开发日趋紧迫<sup>[1]</sup>。煤矿区

煤层气的开发利用是保障煤炭这一主体能源安全生产和国家能源安全的重要措施,按照“先采气,后采煤”的原则,通过先采气进行瓦斯治理,降低采煤风险。但煤矿区煤层气开发面临抽采难度大、抽采效率低、抽采集中度低等困难,煤矿区煤层气利用面临

收稿日期: 2016-03-16; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.05.011

基金项目: 中海石油有限公司 2015-2016 年科技资助项目(YJQYWS-14-33)

作者简介: 李贵川(1968—),男,四川南充人,高级工程师,硕士,现任七元煤矿瓦斯治理与煤层气开发合作项目组副总经理。通讯作者: 张锦虎, Tel: 18735641547 E-mail: Zhangjh@chinachbm.com

引用格式: 李贵川,张锦虎,邓拓,等.煤层气水平井注氮增产改造技术[J].煤炭科学技术,2016,44(5):54-58.

Li Guichuan, Zhang Jinhu, Deng Tuo, et al. Gas output improvement and reconstruction technology of coalbed methane horizontal well by nitrogen injection[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 54-58.

煤层气浓度低、浓度波动大、利用率低等现实难题,煤矿区煤层气开发利用仍然存在诸多瓶颈问题尚未得到解决<sup>[2]</sup>。我国煤层气储存条件具有“三低一高”(低饱和度、低渗透性、低储层压力、高变质程度)的特点,大部分矿区煤层渗透率在  $10^{-7} \sim 10^{-6} \mu\text{m}^2$ ,比美国等国家低3~4个数量级,此类条件下的煤层气开发是世界性难题<sup>[3]</sup>。针对“三低一高”的煤储层特点,必须经过煤储层改造才能获得有工业价值的产量。近年来,国内外学者对煤对氮气的吸附理论<sup>[4-8]</sup>、注入氮气驱替煤层气的作用机理<sup>[9-11]</sup>、煤层气井氮气焖压<sup>[12-14]</sup>、煤层气水力压裂氮气泡沫伴注<sup>[15-20]</sup>等利用氮气进行煤储层改造的方法进行了研究,研究表明向煤层气井内注入氮气对提高煤层气采收率技术上是可行的。鉴于此,七元煤矿瓦斯治理与煤层气开发合作项目组在总结国内外研究资料的基础上,研究注入氮气进行顶替排液、氮气驱替、憋井放喷3种氮气改造模式作用机理,以期得到一套适合于七元煤矿区煤层气水平井筛管完井下的注氮增产改造技术。

## 1 注氮增产改造技术原理

### 1.1 技术原理

利用流体压力激动使井壁破坏产生坍塌形成洞穴,作业时从地面注入氮气,井底压力增大,达到预定压力后憋压,一段时间后迅速卸压,煤岩所受应力变化,井周围煤岩坍塌形成洞穴,重复多次作业,便可达到煤层改造效果,该洞穴方式造穴后在煤层内形成洞穴、剪切破裂带及扰动区,如图1所示。洞穴是由于井壁煤岩坍塌形成,剪切破裂带内煤岩受应力变化作用,渗透率得到较大改善,距井筒越远,渗透率改善程度越低,煤层渗透率越接近原始渗透率;扰动区内煤岩应力也发生变化,但煤岩性质没有变化。

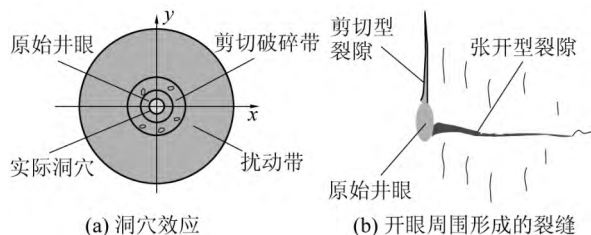


图1 洞穴效应延伸示意

Fig.1 Schematic diagram of the extension of cave effect

注氮增产改造机理主要包括:洗井、解堵;诱导井壁垮塌,清除污染带,改善井眼周边渗透率;氮气

扩散过程中扰动地层,沟通储层割理裂隙,改善井筒远处的渗透率;补充地层能量,并起到分压作用,氮气返排过程中带出部分甲烷并疏通流动通道,降低了甲烷流动所需启动压力,利于压降漏斗快速向地层深处传播,促进甲烷解吸并产出。

### 1.2 技术路线

针对七元煤矿低孔、低压、低含水饱和度煤层特点,常用的排水降压采气方式不再适用。利用向水平井内注入氮气实施多次“注氮-憋压-放喷”作业,通过注氮改造可以清除近井污染,沟通煤层割理裂隙,改善井筒远处煤层渗透率,建立单相气体渗流通道,实现煤层气高效开发目的。结合七元煤矿区的煤储层特点和目前筛管完井煤层气解吸困难情况,为了实现瓦斯治理与煤层气共同开发的需要,探索并创新性地提出了水平井筛管完井下的注氮增产改造技术,该技术主要分为以下3步:①顶替排液,其作用是洗井,清除井眼污染;②氮气驱替,其作用是氮气扩散过程中扰动地层,沟通储层割理裂隙,改善井筒远处的渗透率;③憋井放喷,其作用是形成剪切破裂带,改善井筒远处渗透率,同时补充地层能量,并起到分压作用,氮气返排过程中带出部分甲烷并疏通流动通道,降低了甲烷流动所需的启动压力,利于压降漏斗快速向地层深处传播,促进甲烷解吸并产出。煤层气水平井注氮增产改造技术如图2所示。

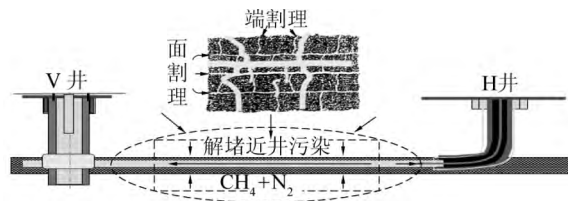


图2 煤层气水平井注氮增产改造技术

Fig.2 Gas output improvement technology of coalbed methane horizontal well by nitrogen injection

## 2 注氮增产改造技术的应用

### 2.1 注氮增产改造技术设计思路

注氮增产改造技术各施工阶段措施如下:①顶替排液阶段按井筒液面设计顶替压力,顶替放喷至少1次;②氮气驱替阶段按处理半径设计氮气总用量,尽量疏通深部储层,在条件允许的情况下,注入压力尽量接近破裂压力;③憋井放喷阶段在保证一定放喷能量的情况下,延长憋井时间有利于氮气深部扩散,条件允许时放喷阀全开。

## 2.2 水平井注氮增产改造技术方案

煤层气水平井工程井(H井)三开完钻之后,水平段下入玻璃钢筛管完井,从H井注入氮气,顶替排液,保证H井与排采直井V井连通,之后关闭V井,按施工设计要求继续向H井注入氮气(或液氮),憋压一段时间后V井和H井同时快速放喷,待V井和H井套压降到0时,停止放喷。可根据实际情况实施多次“注氮-憋压-放喷”作业,通过改造可以清除近井污染带,沟通煤层割理裂隙,从而改善储层渗透率,建立单相气体渗流通道,实现增产目的。

## 2.3 现场应用效果

目前七元煤矿已钻8组U型水平井,产气效果均不理想,通过实施注氮增产改造技术,单井日产气量从不到 $60\text{ m}^3/\text{d}$ 增加到现在 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,Y-1/2/3井组由初期不到 $160\text{ m}^3/\text{d}$ 到现在超过 $2\,500\text{ m}^3/\text{d}$ ,增产改造效果较为明显。

Y-1井于2014年10月9日—11月23日开展

了第1轮注氮增产改造,采用 $600\text{ Nm}^3/\text{h}$ 型膜制氮气设备实施了3次顶替排液,第1次返排出污水、煤粉较多,第2、第3次较少,之后再对Y-1井进行氮气驱替、憋井、放喷等注氮改造,累计注入氮气 $210\,100\text{ m}^3$ ,产气量从改造前的 $32.97\text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $1\,200\text{ m}^3/\text{d}$ ,其中 $\text{CH}_4$ 量超过 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,见效稳产超过4个月,见图3和图4。

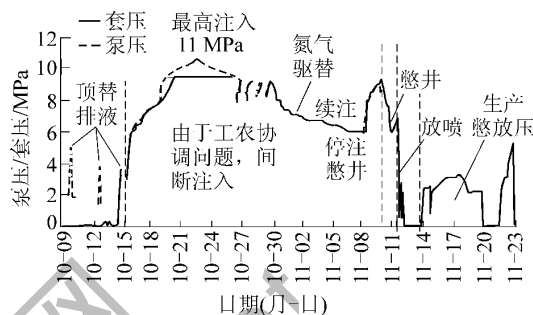


图3 Y-1井第1轮注氮施工曲线

Fig.3 Construction curve of the first round of the Y-1 well

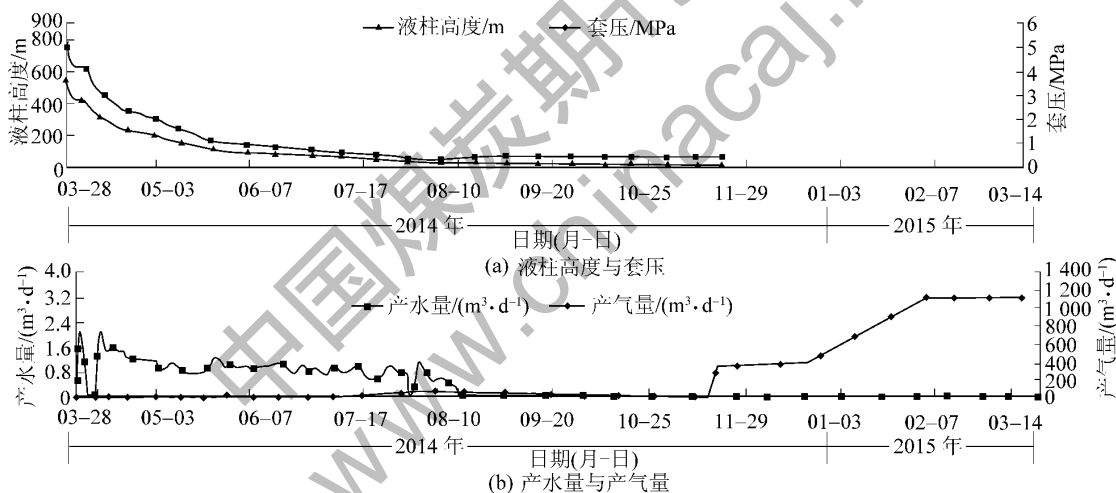


图4 Y-1井第1轮注氮增产改造后排采曲线

Fig.4 Y-1 well first round of nitrogen injection production curve

在完成第1轮注氮增产储层改造之后,针对七元煤矿区储层地质条件,形成了一套水平井注氮改造工艺参数优化设计体系,主要包括:注入压力优化设计、注氮气总量设计、脉冲及段塞式注入设计、放喷流量及井下管柱设计等。通过对工艺参数的优化设计,有利于充分发挥水平井注氮改造的增产效果。七元煤矿首采区6口U型水平井施工参数设计结果见表1。

根据优化设计方案于2015年5月22日—5月24日对Y-1井等进行了第2轮注氮增产改造,从第1轮注氮增产改造中总结经验,本次采用排量 $300\text{ m}^3/\text{min}$ 型液氮设备进行注氮增产改造施工,具有

表1 Y-1/2/3/6/8/14井施工参数设计  
Table 1 Design of coalbed methane horizontal well construction parameters

井号	注气总量/ $\text{m}^3$	注气压力/ MPa	注气排量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	放喷排量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	施工时间/ d
Y-1	233 200	9~17	1 200~1 800	>800	8~9
Y-2	235 200	10~17	1 200~1 800	>800	8~9
Y-3	260 200	8~17	1 200~1 800	>800	9~10
Y-6	325 413	9~17	1 200~1 800	>800	11~12
Y-8	194 438	8~17	1 200~1 800	>800	7~8
Y-14	264 669	8~17	1 200~1 800	>800	9~10

注:①注入方式均为H井套管段塞注入,均注入到15号煤层,段塞注气时,井口压力达到17 MPa时停泵,憋井至压力降至10 MPa时恢复注气,按此方式注气2~3次;②放喷作业时,压力降至6 MPa开始放喷,放喷开度视现场具体情况而定。

施工时间短、压力提升快(实现较高压力下微压裂压裂目的)、可实现脉冲及段塞式注入等特点。首先实施了一次顶替排液,确保水平井井筒内干净无堵塞,之后采用脉冲、段塞式及平稳注入相结合的方式注入氮气,在泵压达到 10 MPa 后,泵压开始波动上升,表征煤层裂隙形成或近井地带煤层有所孔隙疏通,有利于提高改造效果(图 5)。

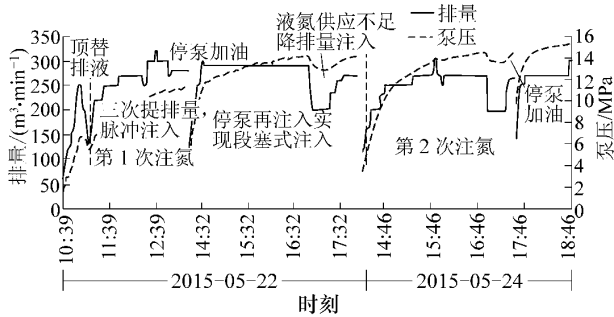


图5 Y-1井第2轮注氮增产改造施工泵压、排量曲线

Fig.5 Y-1 well second round of nitrogen production and transformation of pump pressure displacement curve

第2轮注氮增产改造实施了5口井,在改造之后各井产气量都有所提升,其中Y-3井产气量提高最明显,相比未进行注氮改造前单井日产气量提高了20倍,相比第1轮改造后也提高了3.8倍,达到1 080 m<sup>3</sup>/d,实现了产量突破(图6)。

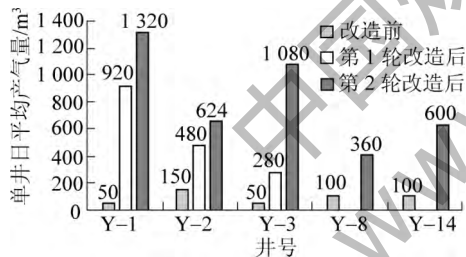


图6 注氮增产改造后5口井平均日产气量效果对比

Fig.6 Comparison of average daily gas production volume of 5 wells after nitrogen injection

### 3 结 语

七元煤矿“三低一高”煤储层特性突出,仅依靠单一降压排采方式无法达到产能目标,必须经过有效的煤储层改造才能得到产量突破,实现快速、高效开发目的。针对七元煤矿的储层特性探索出了一套煤层气水平井注氮增产改造技术,利用“顶替排液、氮气驱替、憋井放喷”等方式进行煤储层改造,实践应用效果良好。利用煤层气水平井注氮增产改造技术的各项工艺技术参数及方案能有效地提高改造

效果。

### 参考文献(References):

- [1] 樊振丽,申宝宏,胡炳南,等.中国煤矿区煤层气开发及其技术途径[J].煤炭科学技术,2014,42(1):1-6.  
Fan Zhenli, Shen Baohong, Hu Bingnan, et al. Coalbed methane development technical access in China coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 1-6.
- [2] 申宝宏,刘见中,雷毅,等.我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J].煤炭科学技术,2015,43(2):1-5.  
Shen Baohong, Liu Jianzhong, Lei Yi, et al. Present status and prospects of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 1-5.
- [3] 罗克勇.煤层气水平井排采控制研究[D].西安:西安科技大学,2011:50-54.
- [4] 刘曰武,苏中良,方虹斌,等.煤层气的解吸/吸附机理研究综述[J].油气井测试,2010,19(6):37-45.  
Liu Yuewu, Su Zhongliang, Fang Hongbin, et al. Review on desorption/adsorption mechanism of coalbed methane[J]. Well Testing, 2010, 19(6): 37-45.
- [5] 姜伟,吴财芳,姜玮,等.吸附势理论在煤层气吸附解吸研究中的应用[J].煤炭科学技术,2011,39(5):102-104.  
Jiang Wei, Wu Caifang, Jiang Wei, et al. Application of adsorption potential theory to study on adsorption-desorption of coalbed methane[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(5): 102-104.
- [6] 杨宏民,于保种,王兆丰,等.基于吸附势理论的煤对N<sub>2</sub>吸附特性的研究[J].煤矿安全,2010,41(4):1-3.  
Yang Hongmin, Yu Baozhong, Wang Zhaozhong, et al. Study on adsorption characteristic of coal to nitrogen based on adsorption potential theory[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(4): 1-3.
- [7] 苏现波,林萌,林晓英,等.吸附势理论在煤层气甲烷吸附中的应用[J].中国煤层气,2006,3(2):28-30.  
Su Xianbo, Lin Meng, Lin Xiaoying, et al. Study of methane adsorption on coal with adsorption potential theory[J]. China Coalbed Methane, 2006, 3(2): 28-30.
- [8] 唐书恒,汤达祯,杨起.二元气体等温吸附实验及其对煤层甲烷开发的意义[J].地球科学,2004,29(2):219-223.  
Tang Shuheng, Tang Dazhen, Yang Qi. Binary-Component gas adsorption isotherm experiments and their significance to exploitation of coalbed methane[J]. Earth Sciences, 2004, 29(2): 219-223.
- [9] 马志宏,郭勇义,吴世跃,等.注入二氧化碳及氮气驱替煤层气机理的实验研究[J].太原理工大学学报,2001,32(4):335-338.  
Ma Zhihong, Guo Yongyi, Wu Shiyue, et al. An experimental study of mechanism of exploiting coalbed methane by injecting carbon dioxide or nitrogen[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 32(4): 335-338.
- [10] 吴世跃,郭勇义.煤层气运移特征的研究[J].煤炭学报,2000,24(1):65-69.  
Wu Shiyue, Guo Yongyi. Study on the movement property of coal

- seam methane[J]. Journal of Coal Society 2000 24(1): 65-69.
- [11] 王晋,王延斌,郭慧,等.围压对注CO<sub>2</sub>置换煤层CH<sub>4</sub>效果的影响研究[J].煤炭科学技术 2015 43(8): 129-134.  
Wang Jin, Wang Yanbin, Guo Hui, et al. Study on surrounding pressure effect of CO<sub>2</sub> injection CH<sub>4</sub> of coal seam[J]. Coal Science and Technology [J]. 2015 43(8): 129-134.
- [12] 罗培培. N<sub>2</sub> 焖压增透实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [13] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. 石油学报 2012 33(1): 149-159.  
Wang Yonghui, Lu Yongjun, Li Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. Acta Petroli Sinica 2012 33(1): 149-159.
- [14] 李晓益, 汪志明, 万鑫, 等. 煤层气裸眼洞穴完井注气增压数值实验[J]. 石油钻探技术 2012 40(2): 14-19.  
Li Xiaoyi, Wang Zhiming, Wan Xin, et al. Numerical experiments of gas injection pressurization for CBM open hole cavity completion[J]. Petroleum Drilling Techniques 2012 40(2): 14-19.
- [15] 倪小明, 贾炳, 曹运兴. 煤层气井水力压裂伴注氮气提高采收率的研究[J]. 矿业安全与环保 2012 39(1): 1-5.  
Ni Xiaoming, Jia Bing, Cao Yunxing. Study on improving coal-bed gas recovery rate by hydraulic fracturing and nitrogen injection of borehole[J]. Mining Safety and Environmental Protection 2012, 39(1): 1-5.
- [16] 孙晗森, 贺承祖. 煤层气氮气泡沫压裂技术的研究与实验[C]//中国煤层气勘探开发利用技术进展. 北京: 地质出版社, 2006.
- [17] 武志学, 郭萍, 候光东, 等. 氮气泡沫压裂液技术在大宁-吉县地区煤层气井的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2012(12): 119-122.  
Wu Zhixue, Guo Ping, Hou Guangdong, et al. Application of nitrogen foam fracturing fluid in Daning Jixian area of CBM wells[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012(12): 119-122.
- [18] 张迪, 马晶翼, 秦伟, 等. 煤层气氮气泡沫压裂井排采认识[J]. 中国石油和化工标准与质量 2013(2): 74-75.  
Zhang Di, Ma Jingyi, Qin Wei, et al. Insight into drainage of coal-bed methane nitrogen foam fracturing well[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality 2013(2): 74-75.
- [19] 孙晗森, 冯三利, 王国强, 等. 沁南潘河煤层气田煤层气直井增产改造技术[J]. 天然气工业 2011 31(5): 21-23.  
Sun Hansen, Feng Sanli, Wang Guoqiang, et al. Qinnan Panhe CBM vertical CBM well production by technology[J]. Natural Gas Industry 2011 31(5): 21-23.
- [20] 中国石油集团长城钻探工程有限公司. 一种煤层气水平井氮气泡沫压裂开采技术: 中国 201310615719[P]. 2014-02-19.
- (上接第10页)
- [6] 石智军, 董书宁. 澳大利亚煤层气开发现状[J]. 煤炭科学技术, 2008 36(5): 20-23.  
Shi Zhijun, Dong Shuning. Present status of coal bed methane development in Australia[J]. Coal Science and Technology 2008 36(5): 20-23.
- [7] 陈艳鹏, 杨焦生, 王一兵, 等. 煤层气羽状水平井井身结构优化设计[J]. 石油钻采工艺 2010 32(4): 82-85.  
Chen Yanpeng, Yang Jiaosheng, Wang Yibing, et al. Optimization of casing program and its application to CBM pinnate horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology 2010 32(4): 82-85.
- [8] 高德利, 鲜保安. 煤层气多分支井身结构设计模型研究[J]. 石油学报 2007 28(6): 113-117.  
Gao Deli, Xian Baoan. Research on design models of multi-lateral well structure for coalbed methane[J]. Acta Petroli Sinica 2007, 28(6): 113-117.
- [9] 曹立虎, 张遂安, 石惠宁, 等. 煤层气多分支水平井井身结构优化[J]. 石油钻采工艺 2014 36(3): 11-14.  
Cao Lihu, Zhang Suian, Shi Huining, et al. Wellbore structure optimization to multi-lateral horizontal CBM well[J]. Oil Drilling & Production Technology 2014 36(3): 11-14.
- [10] 刘彬, 薛志亮, 张坤, 等. 煤层气U型水平连通井缝囊钻井液技术应用实践[J]. 煤炭科学技术 2015 43(9): 105-109.  
Liu Bin, Xue Zhiliang, Zhang Kun, et al. Application to fuzzy ball drilling fluid technology of coalbed methane U shaped horizontal connected wells[J]. Coal Science and Technology 2015 43(9): 105-109.
- [11] 陈德飞, 康毅力, 李相臣, 等. 煤层气钻井过程中钻井液对煤岩储层损害评价[J]. 煤田地质与勘探 2014 42(6): 45-48.  
Chen Defei, Kang Yili, Li Xiangchen, et al. Evaluation of reservoir damage caused by drilling fluid[J]. Coal Geology & Exploration, 2014 42(6): 45-48.
- [12] 黄维安, 邱正松, 杨力, 等. 煤层气钻井井壁失稳机理及防塌钻井液技术[J]. 煤田地质与勘探 2013 41(2): 38-41.  
Huang Weian, Qiu Zhengsong, Yang Li, et al. Instability mechanism of sidewall and anti-sloughing drilling fluid technique for coalbed methane well drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2013 41(2): 38-41.
- [13] 胡汉月, 陈庆寿. RMRS 在水平井钻进中靶作业中的应用[J]. 煤田地质与勘探 2008 44(6): 89-92.  
Hu Hanyue, Chen Qingshou. RMRS application on target-hitting of horizontal drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2008 44(6): 89-92.
- [14] 宋强, 陈霄, 汤福彬, 等. RMRS 精准定位技术在岩盐开采中应用[J]. 中国井矿盐 2011 42(3): 21-23.  
Song Qiang, Chen Xiao, Tang Fubin, et al. Application of RMRS precise positioning technology in rock salt mining[J]. China Well and Rock Salt 2011 42(3): 21-23.
- [15] 向文军, 胡汉月. 国产定向对接井精确中靶技术在盐矿中应用[J]. 中国井矿盐 2010 41(5): 16-18.  
Xiang Wenjun, Hu Hanyue. The application of accurate target technology of domestic directional butted-well in salt mine[J]. China Well and Rock Salt 2010 41(5): 16-18.