

煤层气水平井玻璃钢管固井居中度分析

冯 雷¹ 刘立砖¹ 冯福平² 胡超洋² 黄 芮² 丛子渊²

1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452;

2. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318

摘 要:在煤层气水平井水平段采用玻璃钢套管可以提高后期采煤作业的安全性。为了揭示固井顶替过程中不同时刻玻璃钢管的居中度变化规律,根据玻璃钢管的浮重分析,建立考虑扶正器影响的水平井眼内玻璃钢管居中度计算模型。研究表明:由于玻璃钢管密度较低,随着管内外流体密度的变化,顶替过程中水平段玻璃钢管由井眼低边逐渐上浮,偏向井眼高边,其在水平井眼内的位置及居中度处于动态变化之中;减小水泥浆的密度有利于减小顶替结束时玻璃钢管所受向上的浮重,提高玻璃钢管在水平段的居中度。该研究为煤层气水平井玻璃钢管固井套管居中度的改进提供了理论依据。

关键词:煤层气;水平井;玻璃钢管;固井;居中度

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.03.012

Centrality Analysis of FRP Pipes Cementing in Coalbed Methane Horizontal Well

Feng Lei¹, Liu Lizhuan¹, Feng Fuping², Hu Chaoyang², Huang Rui², Cong Ziyuan²

1. Engineering Technology Company of CNOOC Energy Technology & Services Limited, Tianjin, 300452, China;

2. Institute of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318, China

Abstract: Using fiber reinforced plastic (FRP) pipe in the coalbed methane horizontal well can enhance the security of later coal mining. For revealing centrality change rules of FRP pipe at different stages of cement slurry displacement at different time during coalbed methane horizontal well cementing, on the basis of analysis on buoyant weight of FRP pipe, a centrality calculation model is established by considering the influence of centralizers. The result of the research shows that, because of the low density of the FRP pipe, it will float upward instead of sinking when fluid density changes inside and outside of casing, and its location and centrality may dynamically change. So a lower density of slurry is in favor of reducing buoyant weight of FRP pipe and enhancing its centrality. This research provides theoretical basis for the improvement of centralizer for the FRP pipe.

Keywords: Coalbed methane; Horizontal well; FRP pipe; Cementing; Centrality

收稿日期:2017-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目“超临界二氧化碳环境中动力学反应与冲刷耦合作用下水泥微缝自密封机理研究”(51774094)

作者简介:冯 雷(1981-),男,河北遵化人,工程师,学士,主要从事钻完井工程设计方面的研究工作。

0 前言

煤储层具有低孔、低渗、低压等特点^[1-5],煤层气水平井大多采用注水泥射孔和水力压裂相结合的完井改造方式^[6-10]。目前煤层气水平井通常下入与常规油气井相同的钢制套管^[11-15],然而这种金属材料在后期采煤作业过程中容易产生电火花和摩擦火花,从而导致井下瓦斯爆炸事故,增加了后期煤矿安全生产的隐患^[16]。考虑到后期采煤作业的安全性,煤层水平段推荐选用非金属材质的套管。玻璃钢管作为主要的树脂基复合材料产品,具有耐腐蚀性好、材质轻、强度高、流体阻力小且经济效益好等优点^[17-19],是代替钢制套管在煤层中实现非金属固井的理想材料。目前玻璃钢管已开始应用于煤层气水平井筛管完井^[20],但筛管完井不能进行分段压裂改造,限制了增产措施的实施,因此需要进一步开展煤层气水平井玻璃钢管注水泥固井技术研究,从而满足煤层分段压裂改造技术的要求。然而由于玻璃钢管以及管内钻井液的密度较低,在水泥浆的浮力作用下,固井时水平段内玻璃钢管将会整体上浮偏向井眼高边,与常规钢制套管向井眼低边的偏心有较大的差别。本文根据水平段内玻璃钢管的浮重分析,建立了考虑扶正器影响的水平井眼内玻璃钢管居中度计算模型,揭示了顶替过程中不同时刻玻璃钢管在水平井眼内的居中度变化规律,从而为煤层气水平井玻璃钢管固井套管居中度的改进提供理论依据。

1 水平段内玻璃钢管受力分析

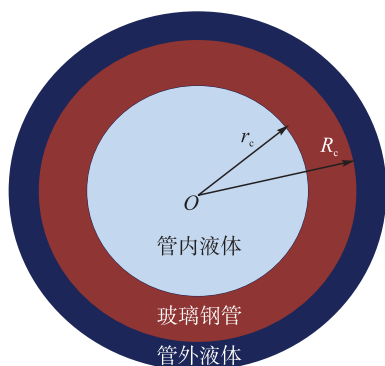


图 1 玻璃钢管在水平井段的状态

玻璃钢管下入水平段后,径向上受到自身重力、管内流体重力以及管外流体浮力的共同作用,玻璃钢管在水平井段的状态见图 1。其在水平段内的单位长度浮重为

$$G = G_c + G_i - G_b \quad (1)$$

其中, $G_c = \rho_g g \pi (R_c^2 - r_c^2)$, $G_i = \rho_i g \pi r_c^2$, $G_b = \rho_o g \pi R_c^2$
式中: G 为单位长度玻璃钢管的浮重, N ; G_c 为单位长度

玻璃钢管的自重, N ; G_i 为单位长度玻璃钢管内流体的重力, N ; G_b 为单位长度玻璃钢管受到的浮力, N ; ρ_g 为玻璃钢管的密度, kg/m^3 ; ρ_i 为玻璃钢管内部流体的密度, kg/m^3 ; ρ_o 为玻璃钢管外部流体的密度, kg/m^3 ; R_c 为玻璃钢管外半径, m ; r_c 为玻璃钢管内半径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

由于玻璃钢管的密度与水泥浆的密度接近,而煤层气钻井使用的钻井液密度接近于清水的密度,在固井过程中的不同时刻,玻璃钢管内外的流体密度差异导致其在水平段内的单位长度浮重变化较大,既有可能为正(合力向下,玻璃钢管整体向井眼低边偏心);也有可能为负(合力向上,玻璃钢管整体向井眼高边偏心)。这一特征与常规钢套管只会产生向井眼低边的偏心有较大差别,玻璃钢管水平井固井过程中的不同时刻其居中度是不断发生变化的。

2 水平段玻璃钢管居中度计算模型

2.1 两扶正器间玻璃钢管挠度变形

为了提高水平井段玻璃钢管的居中度,需要在玻璃钢管上安装扶正器。扶正器尺寸相对较大,在发生偏心时首先与井壁接触。扶正器作用下玻璃钢管变形示意图见图 2。

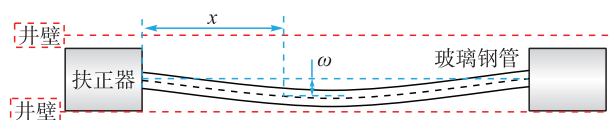


图 2 扶正器作用下玻璃钢管变形示意图

根据均匀载荷作用下简支梁的弯曲力学模型,以水平段内任意两个扶正器间管柱为研究对象,两扶正器间玻璃钢管在浮重作用下的挠度方程为

$$\omega_c(x) = -\frac{Gx}{24EI}(l^3 - 2lx^2 + x^3) \quad (2)$$

式中: ω_c 为玻璃钢管浮重产生的挠度, m ; x 为管柱上的任意位置, m ; E 为玻璃钢管的弹性模量, Pa ; I 为玻璃钢管的惯性矩, m^4 ; l 为两个扶正器之间的距离, m 。

玻璃钢管在浮重作用下, $x=0$ 和 $x=l$ 两个扶正器位置处管柱转角分别为

$$\begin{cases} \theta_c(0) = -\frac{Gl^2}{24EI} \\ \theta_c(l) = \frac{Gl^2}{24EI} \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_c 为浮重作用下管柱在扶正器处的转角, rad 。

2.2 多扶正器弯矩引起的挠曲变形

由于水平段内需要下入多个扶正器,根据多跨连续梁的变形理论可知,相邻管柱会在扶正器处产生弯矩作用,从而改变整体管柱的挠曲变形。弯矩作用下玻璃钢

管在扶正器处产生的转角为

$$\begin{aligned}\theta_{m1}(0) &= \frac{m_1 l}{3EI} & \theta_{m2}(0) &= -\frac{m_2 l}{6EI} \\ \theta_{m1}(l) &= -\frac{m_1 l}{6EI} & \theta_{m2}(l) &= \frac{m_2 l}{3EI}\end{aligned}\quad (4)$$

式中: θ_{m1} 、 θ_{m2} 为管柱在两侧管柱影响下任意位置的转角, rad; m_1 、 m_2 为相邻管柱在扶正器处产生的弯矩, N·m。

若水平段内单位长度玻璃钢管的浮重不为 0, 则玻璃钢管必然会整体偏向井眼低边或井眼高边, 此时扶正器紧贴井壁, 其位置转角为 0, 即

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_G(0) + \theta_{m1}(0) + \theta_{m2}(0) = 0 \\ \theta(l) = \theta_G(l) + \theta_{m1}(l) + \theta_{m2}(l) = 0 \end{cases}\quad (5)$$

式中: θ 为玻璃钢管任意位置处的转角, rad。

将式(3)、(4)带入式(5)联立求解可以得出相邻管柱在扶正器处产生的弯矩为

$$\begin{cases} m_1 = \frac{1}{12}Gl \\ m_2 = -\frac{1}{12}Gl \end{cases}\quad (6)$$

则两端弯矩作用下玻璃钢管的挠曲变形分别为

$$\omega_{m1}(x) = \frac{m_1 x}{6EI}(2l^2 - 3lx + x^2)\quad (7)$$

$$\omega_{m2}(x) = -\frac{m_2 x}{6EI}(l^2 - x^2)\quad (8)$$

式中: ω_{m1} 、 ω_{m2} 为两端弯矩作用下玻璃钢管的挠度。

2.3 水平段玻璃钢管居中度计算

多扶正器条件下水平段玻璃钢管的挠曲变形受到浮重和弯矩的共同影响, 根据叠加原理可知玻璃钢管在水平井眼中的总挠曲变形为

$$\omega(x) = \omega_G(x) + \omega_{m1}(x) + \omega_{m2}(x)\quad (9)$$

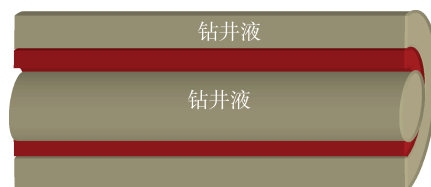
由此可以得出任意位置玻璃钢管在水平井眼内的居中度为

$$\varepsilon(x) = \frac{R_T - R_c - \omega(x)}{r_w - R_c} \times 100\% \quad (10)$$

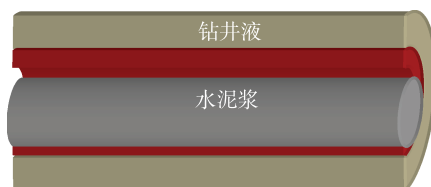
式中: $\varepsilon(x)$ 为任意位置玻璃钢管在水平井眼内的居中度, %; R_T 为扶正器半径, m; r_w 为井眼内半径, m。

3 水平段玻璃钢管居中度规律分析

以外径 114.3 mm, 壁厚 5.69 mm 玻璃钢管为例。扶正器间距为 8 m, 玻璃钢管密度为 $1.995 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 24.1 GPa; 钻井液密度为 $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 水泥浆密度为 $1.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 井眼直径 162.8 mm, 扶正器外径 159 mm。从玻璃钢管下入井眼至水泥浆顶替结束过程中玻璃钢管主要经历四种状态, 见图 3。



a 玻璃钢管刚下入井底



b 水泥浆进入管内但未返出环空



c 管内及环空同时存在水泥浆



d 管内为钻井液，环空为水泥浆

图3 玻璃钢管在固井过程中的四种状态

四种状态下玻璃钢管的浮重计算结果见表 1。

表 1 玻璃钢管在固井过程中四种状态的浮重

顶替过程	管内流体	环空流体	管外流体密度 / ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	环空流体密度 / ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	管外流体浮力 / N	管重 / N	管内流体重量 / N	浮重 / N
a	钻井液	钻井液	1.05	1.05	844.24	304.01	684.24	144.01
b	水泥浆	钻井液	1.8	1.05	844.24	304.01	1 172.98	632.75
c	水泥浆	水泥浆	1.8	1.8	1 447.27	304.01	1 172.98	29.72
d	钻井液	水泥浆	1.05	1.8	1 447.27	304.01	684.24	-459.02

由表1的计算结果可知:顶替过程a时,即玻璃钢管刚下入井底时,管内管外均为钻井液,由于玻璃钢管的密度高于钻井液的密度,因此玻璃钢管受到的浮重向下,玻璃钢管向井眼低边偏心;顶替过程b时,即水泥浆注入管内但还未返出环空时,由于管内的水泥浆重力高于环空钻井液产生的浮力,增加了玻璃钢管受到的向下浮重,玻璃钢管偏向井眼低边的现象更为严重,玻璃钢管的居中效果最差;顶替过程c时,管内管外均为水泥浆,由于玻璃钢管的密度稍高于水泥浆,玻璃钢管还受到向下的浮重作用,但该浮重的数值较小,玻璃钢管在过程b的基础上整体上浮,此时玻璃钢管虽然仍向井眼低边偏心,但挠曲变形最小,居中效果最好;顶替过程d时,管内为顶替液即钻井液,环空为水泥浆,由于水泥浆的密度明显大于钻井液,因此管外水泥浆对玻璃钢管的浮力作用明显高于管内钻进液的重力,此时玻璃钢管受到的浮重为负值,即浮重向上,玻璃钢管在过程c的基础上继续上浮,产生向井眼高边的偏心,这一现象与常规钢套管具有较大的差异。

图4和图5分别为顶替过程中不同时刻玻璃钢管挠曲变形和居中度的变化规律。从图中可以看出,在顶替过程中随着管内外流体密度的变化,水平段玻璃钢管的挠曲变形先增大后减小然后再增大,居中度先减小后增大再减小;玻璃钢管由井眼低边逐渐上浮,偏向井眼高

边,其在水平井眼内的位置及居中度处于动态变化之中;减小水泥浆的密度有利于减小顶替结束时玻璃钢管所受的向上的浮重,从而提高玻璃钢管在水平段的居中度。

4 结论

1)玻璃钢管由于其密度较低,随着管内外流体密度的变化,顶替过程中水平段玻璃钢管由井眼低边逐渐上浮,偏向井眼高边,其在水平井眼内的位置及居中度处于动态变化之中。

2)减小水泥浆的密度有利于减小顶替结束时玻璃钢管所受的向上的浮重,提高玻璃钢管在水平段的居中度。

参考文献:

- [1] 杜新锋,田振林,赵永哲.彬长矿区煤层气水平井钻井与完井技术[J].中国煤层气,2013,10(1):3-5.
Du Xinfeng, Tian Zhenlin, Zhao Yongzhe. Drilling and Completion Techniques of Horizontal Well for Coalbed Methane in Binchang Mining Area [J]. China Coalbed Methane, 2013, 10 (1): 3 - 5.
- [2] 李阳,张浪,舒龙勇,等.潞安矿区煤储层特征及瓦斯含量分布规律研究[J].煤炭科学技术,2014,42(12):65-69.
Li Yang, Zhang Lang, Shu Longyong, et al. Study on Coal Reservoir Features and Gas Distribution Law in Lu'an Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42 (12): 65 - 69.
- [3] 叶建平,吴建光,房超,等.沁南潘河煤层气田区域地质特征与煤储层特征及其对产能的影响[J].天然气工业,2011,31(5):16-20.
Ye Jianping, Wu Jianguang, Fang Chao, et al. Regional Geological and Reservoir Characteristics of the Panhe CBM Gas Field in the Southern Qinshui Basin and Their Influences on CBM Gas Production Capacity [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31 (5): 16 - 20.
- [4] 陈洪伟.平顶山煤田煤储层特征研究[D].淮南:安徽理工大学,2012.
Chen Hongwei. Study Coal Reservoir Characteristics in Pingdingshan Coalfield [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2012.
- [5] 付江伟,张子敏,张玉贵,等.古汉山井田二1煤储层特征及煤层气可采性评价[J].煤矿安全,2008,39(9):89-93.
Fu Jiangwei, Zhang Zimin, Zhang Yugui, et al. Gas Reservoir Characteristics of Coal-bed II 1 and Assessment of Coal-Bed Methane Work-Ability in Guhanshan Coal Mine

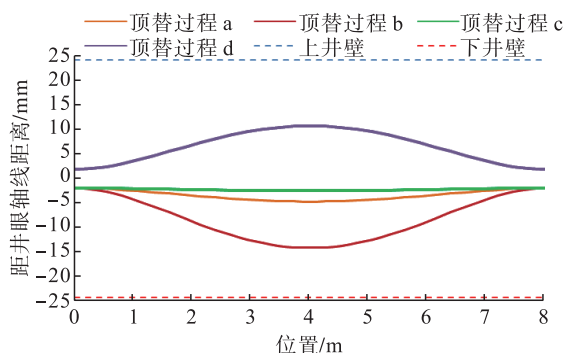


图4 顶替过程中玻璃钢管的挠曲变形变化规律

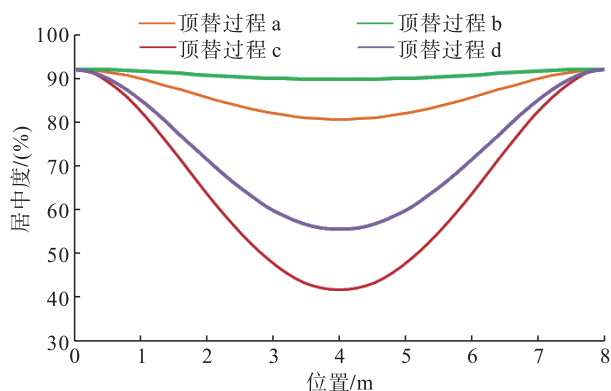


图5 顶替过程中玻璃钢管的居中度变化规律

- [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39 (9): 89-93.
- [6] 吴晋军, 武进壮, 徐东升, 等. 浅层煤层气强脉冲射孔压裂工艺试验研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 10-12.
- Wu Jinjun, Wu Jinzhuang, Xu Dongsheng, et al. Experimental Study on Fracturing Process of Strong Pulse Perforation in Shallow CBM Reservoir [J]. Coal Technology, 2016, 35 (10): 10-12.
- [7] 赵永哲. 松软煤层水平对接井筛管完井工艺技术[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(4): 100-102.
- Zhao Yongzhe. Well Completion Technology by Screen Pipe for Horizontally-Intersected Well in Soft Coal Seam [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42 (4): 100-102.
- [8] 张立刚, 金显鹏, 吕德庆. 煤层气井注水泥顶替效率研究[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 43-46.
- Zhang Ligang, Jin Xianpeng, Lü Deqing. Displacement Efficiency of Cementing in CBM Well [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42 (3): 43-46.
- [9] 袁 淋, 李晓平, 程子洋, 等. 页岩气藏压裂水平井产能及影响因素分析[J]. 天然气与石油, 2014, 32(2): 57-61.
- Yuan Lin, Li Xiaoping, Cheng Ziyang, et al. Analysis on Factors Affecting Fracturing Horizontal Well Production Capacity in Shale Gas Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (2): 57-61.
- [10] 张娅妮, 马新仿. 页岩气体积压裂数值模拟研究[J]. 天然气与石油, 2015, 33(1): 54-58.
- Zhang Yani, Ma Xinfang. Study on Numerical Simulation of Shale Gas Volume Fracturing [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (1): 54-58.
- [11] 齐奉忠, 于永金, 刘子帅. 大宁—吉县地区煤层气水平井固井技术研究与应用[J]. 非常规油气, 2015, 2(1): 54-60.
- Qi Fengzhong, Yu Yongjin, Liu Zishuai. Cementing Technology of Horizontal Coalbed Methane Wells in Daning—Jixian Area [J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2 (1): 54-60.
- [12] 秦 杜, 袁明进, 龙志平, 等. 延川南区块煤层气水平井固井技术的探讨[J]. 中国煤层气, 2013, 10(2): 26-31.
- Qin Du, Yuan Mingjin, Long Zhiping, et al. Discussion about Cementing Technology for Horizontal Coalbed Methane Wells in Yanchuannan Block [J]. China Coalbed Methane, 2013, 10 (2): 26-31.
- [13] 徐培远, 李亚辉. 煤层气U型井水平井套管完井技术探讨[J]. 山东煤炭科技, 2015, (11): 40-41.
- Xu Peiyuan, Li Yahui. Study on Casing Completion Techniques for U-Shaped CBM Wells [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2015, (11): 40-41.
- [14] 王立峰, 徐培远, 刘卫娟, 等. 潘庄区块煤层气U型水平井下套管技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 197-199.
- Wang Lifeng, Xu Peiyuan, Liu Weijuan, et al. Discussion on the Downhole Casing Technology for U Shape CBM Wells of Panzhuang Block [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43 (10): 197-199.
- [15] 孟尚志. 煤层气单支U型水平井合采多层技术研究——以柳林示范区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Meng Shangzhi. The Technology Design for Single U-Type Horizontal Well Exploiting Coalbed Methane Adjacent Formation in Liulin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [16] 杜平彦, 陈俊涛, 刘晓萍, 等. 外覆纤维增强树脂复合钢管在煤矿井下的应用研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 253-254.
- Du Pingyan, Chen Juntao, Liu Xiaoping, et al. Application Research of Outer Cladding Fiber Reinforced Resin Composite Steel Pipe in Coal Mine [J]. Coal Technology, 2016, 35 (10): 253-254.
- [17] 朱四荣, 梁 娜, 李 悦, 等. 玻璃钢管的长期刚度测量及预测[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2492-2499.
- Zhu Sirong, Liang Na, Li Yue, et al. Measurement and Prediction for Long-Term Stiffness of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33 (11): 2492-2499.
- [18] 苏海洋, 申瑞臣, 付 利, 等. 煤层气水平井塑料割缝筛管有限元分析与参数优化[J]. 中国煤层气, 2012, 9(3): 30-34.
- Su Haiyang, Shen Ruichen, Fu Li, et al. Finite Element Analysis of Plastic Slotted Casing for CBM Horizontal Well and Optimization of Parameters [J]. China Coalbed Methane, 2012, 9 (3): 30-34.
- [19] 付 利, 申瑞臣, 苏海洋, 等. 煤层气水平井完井用塑料筛管优化设计[J]. 石油机械, 2012, 40(8): 45-51.
- Fu Li, Shen Ruichen, Su Haiyang, et al. Optimized Design of Plastic Screen Pipe for Coal Bed Methane Horizontal Well Completion [J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40 (8): 45-51.
- [20] 毕延森, 鲜保安, 张晓斌. 煤层气水平井玻璃钢筛管完井工艺技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 106-111.
- Bi Yansen, Xian Bao'an, Zhang Xiaobin. Fiber Reinforced Plastic Screen Pipe Completion Technology of Coalbed Methane Horizontal Well [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (5): 106-111.