

# 多煤层煤层气井分层控压合层排采技术及装备

杜新锋<sup>1</sup>, 郭盛强<sup>2</sup>, 张群<sup>1</sup>, 张东亮<sup>1</sup>, 乔康<sup>1</sup>, 吴静<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>, 王正喜<sup>1</sup>, 杜志强<sup>1</sup>

(1. 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 山西蓝焰煤层气集团有限责任公司, 山西 晋城 048204)

**摘要:**为解决多煤层煤层气开发目前面临的产气量难以叠加、储层伤害难以控制等问题, 提出多煤层煤层气分层控压合层排采技术, 该技术分为双泵三通道双煤层分层控压合层排采技术和双套管多煤层分层控压合层排采技术; 并研制了配套的合层抽采泵、封隔器、排采监测设备等多煤层分层控压合层排采排采装置。实践结果表明: 该技术可实现排采中用不同的动液面控制不同的煤层, 提高煤层气排采效率和产气效果。

**关键词:**多煤层; 煤层气; 分层控压; 合层排采; 排采装置

中图分类号: TD712; P618

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)06-0114-05

## Separate-layer pressure control and multi-layer drainage technology and device for coalbed methane wells with multiple seams

DU Xinfeng<sup>1</sup>, GUO Shengqiang<sup>2</sup>, ZHANG Qun<sup>1</sup>, ZHANG Dongliang<sup>1</sup>, QIAO Kang<sup>1</sup>, WU Jing<sup>1</sup>,

LI Lin<sup>1</sup>, WANG Zhengxi<sup>1</sup>, DU Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group, Xi'an 710054, China;

2. Shanxi Lanyan Coalbed Methane Group Co., Ltd., Jincheng 048204, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the gas was difficult to be produced and the reservoir damage was difficult to be controlled from different seams at the same time during coalbed methane development, the technology of separate-layer pressure control and multi-layer drainage for coalbed methane wells with multiple seams was proposed. The technology is divided into two separate-layer pressure control and multi-layer drainage technologies, the one is for double pump three channel double seam stratified and the other is for double casing multiple seams. The set of multiple seams separate-layer pressure control and multi-layer drainage device includes alloy layers drainage pump, packers and drainage monitoring equipment. The technology can control different coal seams with different dynamic levels in drainage, and can improve the efficiency of coalbed methane drainage and gas production.

**Key words:** multiple seams; coalbed methane; separate-layer pressure control; multi-layer drainage; drainage device

## 0 引 言

排采是煤层气开发的主要环节, 国内外学者通过理论分析、试验研究及工程实践等手段, 在煤层气产气机理<sup>[1-4]</sup>、压降漏斗扩展、井间干扰<sup>[5-10]</sup>和排采过程中煤储层渗透率影响因素及变化规律<sup>[11-16]</sup>等方面进行了较为深入的研究, 取得了许多研究成果, 但对于多煤层排采技术的研究相对较少。倪小明等<sup>[17]</sup>在分析樊庄地区 3 号、15 号煤层合层排采的

可行性时, 认为多煤层能否合层排采主要受上下围岩性质、煤储层供液能力差异、压裂梯度、煤层间距、原始渗透率及压裂后渗透率等因素的影响。李国彪等<sup>[18]</sup>在分析了沁南地区 3 号和 15 号煤层合层排采的资料后, 认为当 2 层煤供液能力差别较大, 且开始产气时间间隔较长时, 动液面难以控制, 不适合合层排采。适用于多煤层煤层气井排采的装置几乎没有。多煤层地区是我国煤层气资源集中赋存区, 煤层气开发前景巨大, 因此, 笔者针对多煤层排采技术

收稿日期: 2018-03-03; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2018.06.019

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045002-007); 山西省煤基低碳科技重大专项资助项目(MQ2016-01)

作者简介: 杜新锋(1975—), 男, 陕西华县人, 研究员。E-mail: duxinfeng@cctegxian.com

引用格式: 杜新锋, 郭盛强, 张群, 等. 多煤层煤层气井分层控压合层排采技术及装备[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 114-118, 188.

DU Xinfeng, GUO Shengqiang, ZHANG Qun, et al. Separate-layer pressure control and multi-layer drainage technology and device for coalbed methane wells with multiple seams[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 114-118, 188.

及装备进行研究,以期提高煤层气排采效率。

## 1 多煤层排采面临的技术难题

相对于单煤层而言,在排采过程中,尽管各煤层产气机理、储层伤害机理相同,但由于“单一管柱、同享井筒”,且用同一个排采制度进行管理,造成多煤层在合层排采中主要面临以下技术难题:

1) 多煤层产气量难以叠加。对于多煤层而言,由于各储层压力梯度、含气性、吸附性等特征的差异,引起临界解吸压力不一致,造成产气时间有先后,难以做到多煤层的产量叠加,影响排采效率。针对该问题,有学者提先排采高压系统的煤层(组),待压力降到下一煤层(组)临界解吸压力时,再压裂该煤层(组),依次进行递进排采<sup>[19]</sup>。这种思路在技术上有其合理的地方,但由于排采效率低,且现场作业有一定的难度,不能满足大规模煤层气开发的要求。

2) 储层伤害难以控制。对于间距较大的多煤层合层排采,在一个压力系统下很难兼顾储层伤害难题。如果动液面降的快,很可能引起上部煤层的应力差效应,造成生产流速过快、压降漏斗扩展受限、煤粉堵塞等,如果动液面降的太慢,则会造成下部储层受到外来液体的伤害。

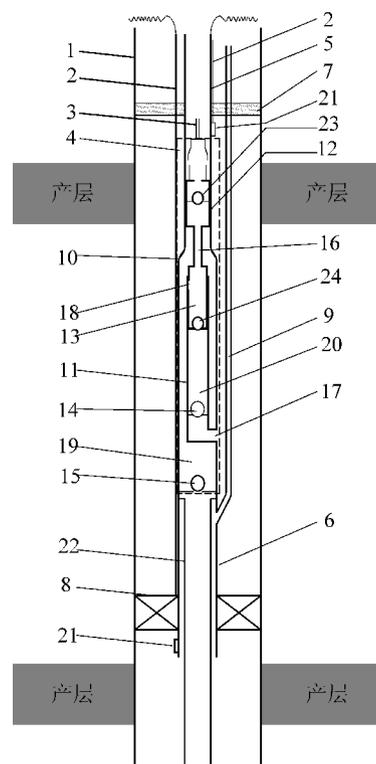
## 2 多煤层分层控压合层排采技术

排采中储层伤害的难题在单煤层排采时,通过合理调整动液面,控制井底流压完全可以解决,而在多煤层排采却成了难题。究其原因,一方面是因为多煤层气排采时用同一个压力系统来管理多个煤层,容易造成煤储层伤害,影响产气量;另一方面是由于采用一个动液面控制多个煤层的储层压力,导致产气时间的差异,不能实现产量叠加,排采效率低下。基于此,提出分层控压合层排采技术,其原理是根据煤层储层特征的差异,将各产层封隔成各个独立的压力系统,用不同的动液面对各目标煤层进行分层管理,提高煤层井排采效率和产量。该技术又可分为双泵三通道双煤层分层控压合层排采技术和双套管多煤层分层控压合层排采技术,分别适用于双煤层气和多煤层(2层以上煤层)。

### 2.1 双泵三通道多煤层分层控压合层排采技术

双泵三通道中的“双泵”,指的是合层抽采泵,它由2个泵腔、2个吸入口组成;“三通道”指的在煤层封隔的条件下,主通道用于产液,第二通道作为下

部煤层的产气通道,第三通道用于电子压力计电缆穿越。双煤层分层控压合层排采装置主要针对双产层煤层气井的合层排采,该技术将2个产层分隔成2个压力系统,实现双煤层煤层气井的分层控压合层排采。其控压方法是在2个目标煤层之间设置1个封隔器,阻断煤层间的水力联系,使得各煤层处于适合自身储层特征的压力系统中,排采时通过合层抽采泵抽取各煤层中的水,在井下电子压力计和井口回流装置的辅助下控制2个产层的动液面。双煤层分层控压合层排采装置由合层抽采泵、封隔器、辅助连通管、油管、油管扶正器、电子压力计系统和抽油杆等构成(图1)。



1—生产套管;2—压力计电缆;3—抽油杆;4—合层抽采泵;  
5—上油管;6—下油管;7—扶正器;8—封隔器;9—辅助连通管;  
10—外泵筒;11—内泵筒;12—上柱塞;13—下柱塞;  
14—上固定阀;15—下固定阀;16—空心连通杆;17—吸入口;  
18—进水孔;19—第一空腔;20—第二空腔;21—压力计;  
22—进水管;23—上游动阀;24—下游动阀

图1 双煤层分层控压合层排采装置及井下位置示意

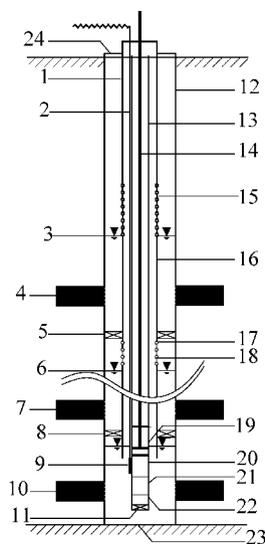
Fig.1 Schematic diagram of double coal pressure control and drainage device and down-hole position

当抽油杆上下往复运动时,带动上、下游动阀同时运动。封隔器以上的液体经过油管开孔由上固定阀抽出;封隔器以下的液体经过下产气管底端由下固定阀抽出,解吸的气体由辅助连通管产出。辅助

连通管的管口高于上煤层动液面位置,2个煤层所产生的气体在上煤层动液面位置以上汇合,经油管 and 套管环空产出。

## 2.2 双套管多煤层分层控压合层排采技术

双套管多煤层分层控压合层排采技术是在生产套管与油管之间设置一个内置套管,内置套管与生产套管之间通过设置封隔器隔离煤层,在各煤层上方一定距离的附加套管上设置有出水孔,从而保证各个目标煤层在各自适合的孔隙压力范围内进行排采。双套管单泵分层控压合层排采装置由内置套管、油管、抽油杆、沉砂管和筛管、封隔器、电子压力计和管式泵等构成(图2)。



1—上部煤层产气孔;2—压力计电缆;3—第一筛眼段最下排筛眼位置;  
4—上部产层;5—第一封隔器位置;6—第二筛眼段最下排筛眼位置;  
7—第二产层;8—第二封隔器;9—压力计;10—下部产层;11—丝堵;  
12—生产套管;13—油管;14—抽油杆;15—第一筛眼段;16—内置套管;  
17—产气孔;18—第二筛眼段;19—管式泵;20—压力计托筒;21—筛管;  
22—沉砂管;23—人工井底;24—环形钢板

图2 多煤层双套管分层控压合层排采示意

Fig.2 Schematic diagram of multi coal seam double casing pressure control and drainage

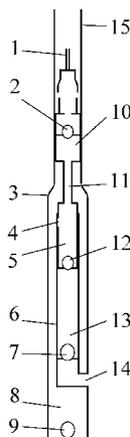
排采时,井筒液面下降到上部煤层产气位置后,上部煤层开始从最上部产气孔产气,随着井筒液面继续缓慢下降,当井筒内液面下降到上部煤层对应筛眼段以下时,上部煤层对应的生产套管与内置套管环空产出水通过筛眼段流入井筒,同时动液面保持在对应筛眼段最下排筛眼位置,不再改变;井筒液面继续缓慢下降,下降到下部煤层产气位置,下部煤层开始产气,同时其液面保持在对应筛眼段最下排筛眼位置;这样,在排采过程中,既保证了各产层同

时产气,又使各产层上部均保留有一定的动液面高度,避免动液面下降过快造成的层间干扰问题。

## 3 多煤层分层控压合层排采装置

### 3.1 合层抽采泵

合层抽采泵是双煤层分层控压合层排采装置的关键组成部分,其构成包括泵筒、柱塞、固定阀等(图3)。合层抽采泵为双筒结构,包括外泵筒和内泵筒,其中,内泵筒悬空设置于外泵筒内,入井时,外泵筒顶部与上油管连接,底部与下油管连接。柱塞包括上柱塞和下柱塞,固定阀包括上固定阀和下固定阀;下柱塞和上固定阀分别位于内泵筒的上端和下端,上柱塞位于外泵筒和上油管内,抽油杆与上柱塞连接,上柱塞和下柱塞之间通过空心连通杆连通;下固定阀位于外泵筒的底端,内泵筒底端侧面设置有吸入口,下柱塞侧面设置有进水孔,吸入口和进水孔均为通孔。下固定阀与外泵筒围成第一空腔,上固定阀与下柱塞围成第二空腔。



1—抽油杆;2—上滑动阀;3—外泵筒;4—进水孔;5—下柱塞;  
6—内泵筒;7—上固定阀;8—第一空腔;9—下固定阀;10—上柱塞;  
11—空心连通杆;12—下滑动阀;13—第二空腔;14—吸入口;15—上油管

图3 合层抽采泵示意

Fig.3 Schematic diagram of laminated pumping

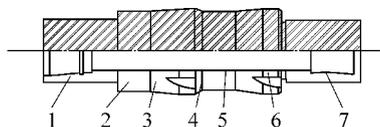
工作时,合层抽采泵通过抽油杆带动柱塞做上、下冲程运动;下产层液体通过下固定阀、进水口和上滑动阀进入上油管,上产层液体通过吸入口、上固定阀柱塞进入油管,排出井口,从而达到不同产层合层排采的目的。

### 3.2 封隔器

目前,国内封隔器的种类和型号较多,主要有自封式、压缩式、嵌入式和扩张式等类型,考虑到煤层气井多煤层封隔的复杂性,双煤层分层控压合层排采装置采用皮碗式自封封隔器,多煤层分层控压合

层排采装置选用 Y221 型压缩式封隔器。

1) 皮碗式自封封隔器。该封隔器主要由上接头、皮碗座、皮碗、中心管、定位压环、下接头及 O 型密封圈等组成(图 4)<sup>[20]</sup>,采用液压自封原理,靠封隔器外径与套管内径的过盈和压实实现密封。皮碗是皮碗式封隔器最关键的部件,它是在金属骨架上硫化橡胶而成,具有耐压、抗拉和耐高温特性,皮碗的碗口为密封唇,其外径略大于套管内径 2~4 mm。



1—下接头;2—皮碗座;3—皮碗;4—O型密封圈;

5—中心管;6—定位压环;7—上接头

图4 皮碗式自封封隔器示意

Fig.4 Schematic diagram of skin bowl self sealing packer

相比较而言,皮碗式封隔器无锚定结构,坐封和解封不需要附加其他动力设备,便于以后的检泵作业,但其封隔的压力与上覆液柱的高度有关。另外在使用时应应对生产套管进行刮削,防止皮碗损伤,影响分割效果。

2) Y221 型压缩式封隔器。Y221 型封隔器由胶筒、卡瓦总成和摩擦换向总成等组成。Y221 封隔器为单向卡瓦支撑,上提正转管柱后下放压缩座封,上提管柱解封。封隔器下井时,换向销钉处于换向槽的下死点,当下至设计位置时,上提封隔器使换向销钉处于换向槽的上死点,正转管柱 2~3 圈时,换向销钉借助摩擦块与套管的磨擦力,脱离换向槽,下放封隔器,卡瓦被撑开并咬住套管壁,这时再下放管柱,在管柱重力作用下,封隔器坐封。上提管柱卡瓦收回即可解封起出。

### 3.3 分层控压合层排采的监测设备

1) 电子压力计。常规煤层气井多采用回声仪定时测量液面,测量结果易受产气影响,可靠性较低,多煤层分层控压合层排采选用直读式电子压力计监测动液面。直读式电子压力计由井下压力计、连接电缆与密封装置、地面数据处理和显示设备 3 个部分组成(图 5)。直读式压力计通过电缆将数据实时传回地面,通过地面处理和显示装置,直接读取压力和温度数据。

电子压力计安装于压力计托筒中,压力计托筒与电缆固定于油管侧壁上,随油管一起被下入井下预定位置。双煤层分层控压合层排采装置采用双压力计监测不同产层的动液面,上产层和下产层压力

计分别置于合层抽采泵的上部和皮碗封隔器的下部,通过三通道油管扶正器固定。

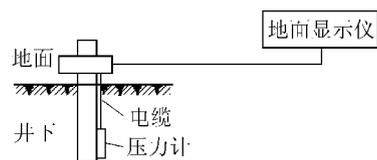


图5 井下压力计工作示意

Fig.5 Working schematic of down-hole pressure gauge

2) 井下电视系统。井下电视系统由井下摄像装置、图像显示与采集装置、地面缆车收放装置等组成。其中井下摄像装置拍摄井壁图像,经过测井双绞电缆的信号传输,将图像传输地面,由主控机采集与显示;地面缆车收放装置主要功能是将井下摄像装置放置井下特定位置,同时,缆车收放装置可检测井下深度。

多煤层分层控压合层排采中,井下电视的使用主要是来判断各产层的产气和产水状况。将井下管柱提出井口后,在液面还没有完全恢复时,快速将井下电视下入井下,来判断通过各产层弹眼的气泡和水泡来分析产层是否产气、产水以及产量的大小。另外随着技术的发展,井下摄像装置尺寸越来越小,目前正在进行将摄像装置随油管下入井筒的试验。

### 3.4 其他设备

1) 井口回流装置。在常规的合层抽采泵中,上、下泵筒的泵径大小是有差异的,一般上泵筒的泵径大于下泵筒,在同样的排采制度下(冲程、冲程相同),上煤层的产水量应该大于下煤层,这就预示着上煤层动液面要比上煤层下降的快。排采时排采制度主要是围绕下煤层来制定的,如果 2 个动液面均下降过快,可以通过降级冲次来控制下降速度;如果上煤层下降过快,可以通过井口回流装置调节上煤层的动液面下降速度,使得 2 个目标煤层在合理的压降速度下进行排采。井口回流装置结构简单,主要由生产阀、回压阀、过滤筒、水管线、测试阀和回注设备等组成,如图 6 所示。

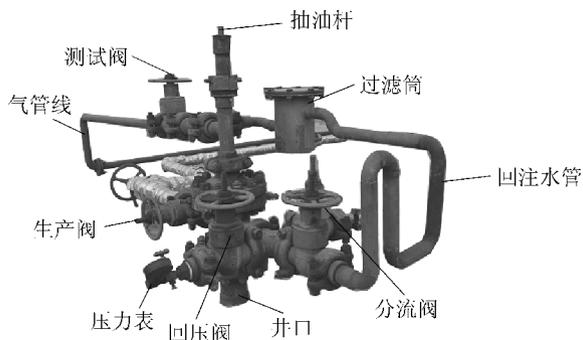


图6 井口回流装置实物照片

Fig.6 Well head reflux device photo

2)多通道油管扶正器。双煤层分层控压合层排采装置的扶正器与常规扶正器不同,其采用“半合式”结构,内部设置电缆线通道和辅助联通管通道(图7),便于拆卸和清洗,不仅可以确保油管居中,减少偏磨现象发生,而且可有效固定电缆线和辅助联通管。



图7 扶正器实物照片

Fig.7 Physical photo of centralizer

3)辅助连通管。辅助连通管作为双泵三通道下产层产气管道,一般选用连续不锈钢管,辅助连通管可以连接至封隔器以上,也直接连接至井口,并通过单独的气体流量计进行计量。

## 4 结 语

多煤层煤层气开发中用一个动液面控制多个煤层排采,是导致气井储层伤害严重、产气效率低下的根本原因,提出一套分层控压合层排采技术,包括双泵三通道双煤层分层控压合层排采技术和双套管多煤层分层控压合层排采技术,并研制配套了相应的装备。该研究成果,进一步丰富完善了煤层气排采理论和方法,对于开展我国多煤层煤层气资源开发具有良好的指导意义,应用前景广阔。

### 参考文献(References):

[1] PASHIN J C, GROSHONG Jr R H. Structural control of coalbed methane production in Alabama[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 38(1/2): 89-113.

[2] 李国富,田永东.煤层气井排水采气机理浅探[J].中国煤炭, 2002, 28(7): 33-36.

LI Guofu, TIAN yongdong. A tentative analysis of the mechanism of water discharge aided CBM extraction[J]. China Coal, 2002, 28(7): 33-36.

[3] 崔金榜,李 沛,马东民,等.煤层气水平井井筒煤粉迁移规律试验研究[J].煤炭科学技术, 2016, 44(5): 74-78, 176.

CUI Jinbang, LI Pei, MA Dongmin, et al. Experiment study on migration law of pulverized coal in borehole of coalbed methane horizontal well [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 74-78, 176.

[4] 李 瑞,王生维,吕帅锋,等.煤层气排采过程中储层压降动态变化影响因素[J].煤炭科学技术, 2017, 45(7): 93-99.

LI Rui, WANG Shengwei, LYU Shuaifeng, et al. Dynamic varied influence factors of pressure drop in coal reservoir during coalbed

methane drainage process [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 93-99, 39.

- [5] 田永东.试论煤层气地面开发的规模性[J].科技情报开发与经济, 2005, 15(13): 163-165.
- TIAN Yongdong. Discussion on the ground developing scale of coal-bed methane (CBM) [J]. Tech Information Development & Economy, 2005, 15(13): 163-165.
- [6] HARRISON S M, GENTZIS T, PAYNE M. Hydraulic, water quality, and isotopic characterization of Late Cretaceous-Tertiary Ardley coal waters in a key test-well, Pembina-Warburg exploration area, Alberta, Canada [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2006, 54(3): 238-260.
- [7] 杜彩霞,张遂安,刘 程,等.煤层气规模开发条件下压力传播特征研究[J].煤炭科学技术, 2016, 44(12): 179-183.
- DU Caixia, ZHANG Suian, LIU Cheng, et al. Study on reservoir pressure transmission feature of coalbed methane under condition of multi-well exploitation [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 179-183.
- [8] 杨新乐,张永利,肖晓春.井间干扰对煤层气渗流规律影响的数值模拟[J].煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 26-29.
- YANG Xinle, ZHANG Yongli, XIAO Xiaochun. The numerical simulation of seepage rule of coalbed gas under the condition of inter-well interference [J]. Coal Geology & Exploitation, 2009, 37(4): 26-29.
- [9] 刘升贵,郝 耐,王建强.煤层气水平井降压漏斗扩展规律研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2012, 31(1): 8-11.
- LIU Shenggui, HAO Nai, WANG Jianqiang. Pressure drop funnel extension of coalbed methane horizontal well [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2012, 31(1): 8-11.
- [10] 刘世奇,桑树勋,李梦溪,等.沁水盆地南部煤层气井网排采降压漏斗的控制因素[J].中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 943-950.
- LIU Shiqi, SANG Shuxun, LI Mengxi, et al. Control of factors of coal-bed methane well depressurization cone under drainage well net-work in Southern Qinshui Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 943-950.
- [11] MAVOR M J, VAUGHN J E. Increased absolute permeability in the Sanjuan basin fruit and formation [C] // Paper 9738 Presented at the Proceeding of the International Coalbed Methane Symposium, University of Alabama, Tuscaloosa, 1997: 33-45.
- [12] HARPALANI S, CHEN G. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal [J]. International Journal of Geotechnical and Geological Engineering, 1997, 15: 303-325.
- [13] 陈振宏,陈艳鹏,杨焦生,等.高煤阶煤层气储层动态渗透率特征及其对煤层气产量的影响[J].石油学报, 2010, 31(6): 966-969.
- CHEN Zhenhong, CHEN Yanpeng, YANG Jiaosheng, et al. Reservoir dynamic permeability of high rank coalbed methane

(下转第188页)

- [11] 杨宇,曹煜,田慧君,等.压裂中煤粉对煤储层损害机理分析与防控对策[J].煤炭科学技术,2015,43(2):84-87.  
YANG Yu, CAO Yu, TIAN Huijun, *et al.* Mechanism analysis of coal fines damaged to coal reservoirs and prevention countermeasures during fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2):84-87.
- [12] 刘升贵,彭智高,李仲力,等.煤层气水平分支井稳定性的数值分析[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2015,34(7):769-773.  
LIU Shenggui, PENG Zhigao, LI Zhongli, *et al.* Numerical analysis of coalbed methane horizontal branch well stability[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2015, 34(7):769-773.
- [13] 魏迎春,张傲翔,李超,等.临汾区块煤层气排采中煤粉产出的影响因素及其关系[J].煤矿安全,2017,48(4):191-194.  
WEI Yingchun, ZHANG Aoxiang, LI Chao, *et al.* Influencing factors of pulverized coal output and their relationship during coalbed methane drainage in Linfen Block[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(4):191-194.
- [14] 张双斌,苏现波,郭红玉,等.煤层气井排采过程中压裂裂缝导流能力的伤害与控制[J].煤炭学报,2014,39(1):124-128.  
ZHANG Shuangbin, SU Xianbo, GUO Hongyu, *et al.* Controlling the damage of conductivity of hydraulic fractures during the process of drainage in coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1):124-128.
- [15] 皇凡生,康毅力,游利军,等.排采降压诱发煤层剪切破坏机理与防控对策[J].煤炭学报,2017,42(7):1803-1810.  
HUANG Fansheng, KANG Yili, YOU Lijun, *et al.* Mechanisms and control methods of depletion-induced shear failure of coalbed seams[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7):1803-1810.
- [16] SOLIMAN M Y, EAST L, ADAMS D. Aeromechanics aspects of multiple fracturing of horizontal and vertical wells [C]. International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, 2004.
- [17] MARCINEW R P, HINKEL J J. Coal fines - origin, effects and methods to control associated damage [C]. Annual Technical Meeting, Petroleum Society of Canada, 1990.
- [18] SNEDDON I N, ELLIOT H A. The opening of a Griffith crack under internal pressure [J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1946, 4(3):262-267.
- [19] SNEDDON I N. The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid [C]. // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society, 1946, 187:229-260.
- [20] WARPINSKI N R, BRANAGAN P T. Altered stress fracturing [J]. Journal of Petroleum Technology, 1989, 41(9):990-997.
- [21] 程林松. 高等渗流力学 [M]. 北京:石油工业出版社, 2011:69.
- [22] WRIGHT C A, CONANT R A, GOLICH G M, *et al.* Hydraulic fracture orientation and production/injection induced reservoir stress changes in diatomite water floods [C]. the Western Regional Meeting, Bakersfield, California, USA, SPE, 1995.
- [23] 李同林. 应用弹塑性力学 [M]. 北京:中国地质大学出版社, 2002:9.
- [24] 韩颖,张飞燕,杨志龙.基于D-P准则的巷道围岩稳定性分析[J].煤矿安全,2014,45(6):196-199.  
HAN Ying, ZHANG Feiyan, YANG Zhilong. Stability analysis of roadway surrounding rock based on D-P criterion [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(6):196-199.
- [25] 申卫兵,张保平.不同煤阶煤岩力学参数测试[J].岩石力学与工程学报,2000,19(S1):860-862.  
SHEN Weibing, ZHANG Baoping. Test study on mechanical parameters of coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S1):860-862.

(上接第118页)

- and its effect on the coalbed methane output [J]. Acta Petroli Sinica, 2010, 31(6):966-969.
- [14] 杜新锋.不同煤体结构煤储层煤层气排采中渗透率变化规律研究[J].煤矿安全,2015,46(6):8-11.  
DU Xinfeng. Study on permeability change law of coalbed methane in coal reservoir with different coal structure in drainage process [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(6):8-11.
- [15] 杜新锋.煤层气排采过程中渗透率变化规律及动液面控制研究[J].煤炭工程,2015,47(7):93-96.  
DU Xinfeng. Research on variation law of coal reservoir permeability and dynamic water level control in coal bed methane drainage [J]. Coal Engineering, 2015, 47(7):93-96.
- [16] 杜严飞,吴财芳,邹明俊,等.煤层气排采过程中煤储层压力传播规律研究[J].煤炭工程,2011,43(7):87-89.  
DU Yanfei, WU Caifang, ZOU Mingjun, *et al.* Study on reservoir pressure transmission law during gas mining and drainage process of coalbed methane well [J]. Coal Engineering, 2011, 43(7):87-89.
- [17] 倪小明,苏现波,李广生.樊庄地区3#和15#煤层分层排采的可行性研究[J].天然气地球科学,2012,21(1):144-149.  
NI Xiaoming, SU Xianbo, LI Guangsheng. Feasibility of multi-layer drainage for No.3 and No.15 coal seams in the Fanzhuang Area [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 21(1):144-149.
- [18] 李国彪,李国富.煤层气井单层与合层排采异同点及主控因素[J].煤炭学报,2012,37(8):1354-1358.  
LI Guobiao, LI Guofu. Study on the differences and main controlling factors of the coalbed methane wells between single layer and multi-layer drainage [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8):1354-1358.
- [19] 傅雪海.我国煤层气勘探开发现存问题及发展趋势[J].黑龙江科技学院学报,2012,22(1):1-5.  
FU Xuehai. Existing problems and development trend of CBM exploration and development in China [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2012, 22(1):1-5.
- [20] 国建军,赵玉华.特种抽油泵及常用井下工具手册 [M]. 北京:石油工业出版社, 2009:35-36.