

韩城区块煤储层间接压裂地质主控因素研究

熊先锐¹,边利恒¹,王伟¹,王社民¹,王禾苗²,张颖¹,千少聪¹

(1. 中石油煤层气有限责任公司,北京 100028;2. 学大教育集团西安分公司,陕西 西安 710054)

摘要:为解决间接压裂技术在韩城区块适应性问题,采用控制变量法对影响间接压裂产气量的地质因素进行了定量研究,提出了在相同的条件下,增大射开顶板比例可在一定程度上提高间接压裂的改造效果。研究结果表明:影响间接压裂效果的地质主控因素为煤层顶板特性和煤体结构,其中当顶板为砂岩时,影响间接压裂效果的主要因素依次为层理、沉积韵律、泥质夹层、天然裂隙和砂体含水性;顶板为泥岩时,脆性指数的大小影响着间接压裂的改造效果,泥岩脆性指数大于40时,间接压裂对于增产才有效。而煤体结构对间接压裂的影响主要表现在:煤体结构越破碎,人工裂缝越不容易在煤层中延伸,且排采过程中更易产出煤粉,导致间接压裂增产效果变差。

关键词:韩城区块;煤储层;间接压裂;主控因素;顶板岩性;煤体结构

中图分类号:P542;P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)06-0189-07

Research on main geological controlling factors of coal reservoir indirect fracturing in Hancheng Block

Xiong Xianyue¹, Bian Liheng¹, Wang Wei¹, Wang Shemin¹, Wang Hemiao², Zhang Ying¹, Qian Shaocong¹

(1. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China;

2. Xi'an Branch, Xueda Education Group, Xi'an 710054, China)

Abstract:In order to solve the adaptability problems of high-degree indirect fracturing technology in Hancheng Block, by adopting the method of control variables, geological factors influencing gas production of indirect fracturing was quantitatively analyzed, it was also proposed that in the same conditions improving the strengths of perforated roof could increase the optimizing effects of indirect fracturing. The results show that main geological controlling factors affecting the effects of indirect fracturing by ordinal are sediment bedding, rhythm, shale intercalation, natural fracture and sand body aquosity; when roof is mudstone, brittleness index controls stimulation effect of indirect fracturing, main geological controlling factors affecting the effects of indirect fracturing are roof of coal seam and structure of coal body. The effect of indirect fracturing is influenced when roof is sandstone, only if the brittleness index of mudstone is larger than 40, the indirect fracturing can play a role on increasing the gas production. The impact of coal structure on indirect fracturing is mainly reflected as follows: if coal structure get fragmentized, it is more difficult for artificial fracture to extend in the coal seam, and it is prone to produce coal powder during drainage, which has caused the effects of gas production caused by indirect fracturing.

Key words:Hancheng Block; coal reservoir; indirect fracturing; main controlling factor; roof lithology of coal seam; structure of coal body

0 引言

国内煤层渗透率普遍较低,其中95%的煤层渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,一般采用水力压裂技术提高煤层气的采收率^[1-2]。水力压裂技术对低渗透软煤的改造有限,主要表现在以下2个方面:^①人工裂缝

不易扩展,裂缝粗短,导致排采稳产期短,产气量衰减快,实际采收率未达预期;^②煤层压裂施工期间,产生大量煤粉,导致排采期间煤粉不定期产出,修井频繁,增加了生产运维成本,影响了排采的连续性。

针对当前问题,国内外许多学者的研究方向将压裂的主体由煤层本身逐渐转向煤层的顶底板。

收稿日期:2016-12-12;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.06.031

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05042-004)

作者简介:熊先锐(1984—),男,湖北荆州人,博士。Tel:18220638490,E-mail:642827953@qq.com

引用格式:熊先锐,边利恒,王伟,等.韩城区块煤储层间接压裂地质主控因素研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):189-195.

Xiong Xianyue, Bian Liheng, Wang Wei, et al. Research on main geological controlling factors of coal reservoir indirect fracturing in Hancheng Block [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 189-195.

1996年,陈斌^[3]提出通过围岩开采煤层气的方案;2001年,赵阳升等^[1]提出“卸压开采”的煤层气开采理念;2003年,Arnold Iii W T等^[4]提出间接压裂的概念,其定义为:对与疏松层毗邻的强硬层压裂改造,裂缝在强硬层和疏松层间延展。2007年,Olsen T N等^[5]和Michael J Economides等^[6]将间接压裂技术应用到煤层气井的开采中,并逐渐发展为间接垂直压裂导流技术(IVFC),其应用对象为紧邻煤层或多套煤层之间的低应力砂岩或粉砂岩。2007年,饶孟余等^[7]、张金波等^[8]提出“虚拟产层”等煤层气的开发理念。

2013年,边利恒等^[9]将间接压裂技术应用于鄂尔多斯盆地东南缘韩城区块,共计120余口煤层气井,截至2016年6月累计新增产气量8 000余万m³,与常规的只射开煤层的压裂技术相比,间接压裂平均单井日产气量增产近1 000 m³,产生了巨大的经济效益、社会效益和生态效益。间接压裂试验井整体产气效果较好,但部分井增产效果不明显,因此,有必要对影响间接压裂产气效果的因素进行深入研究,而地质主控因素的研究是提高间接压裂技术成熟度的关键。该方向的研究为生产亟需,意义重大。

笔者分别从煤层顶板特性和煤体结构2个方面入手,对地质主控因素进行了研究,深入分析了不同煤层顶板和煤体结构情况下的间接压裂增产影响因素,为间接压裂技术在煤层气开采上实现稳产增产奠定了坚实的基础,丰富了间接压裂技术的理论成果,为进一步推广和应用间接压裂技术于其他更多煤储层地质条件下的煤层气开采提供思路。

1 区域地质概况

韩城区块位于鄂尔多斯盆地东南缘渭北隆起东北部,区域构造位置如图1所示。区块煤层气的主要开发层位为二叠系山西组3号、5号和太原组11号煤层。此3套煤层煤体结构破碎,煤层孔隙度为4.1%~9.0%,渗透率为 $(0.02\sim0.35)\times10^{-3}$ μm²,弹性模量为5 987.70~7 608.39 MPa,泊松比为0.19~0.28,煤层的自身强度低,遇外力易破碎,属于低渗透软煤,整体不利于压裂改造。

2 影响间接压裂效果的地质主控因素

关于提到的间接压裂技术^[9],即通过水力压裂同时射开煤层和顶板的一种压裂方式,使裂缝主要

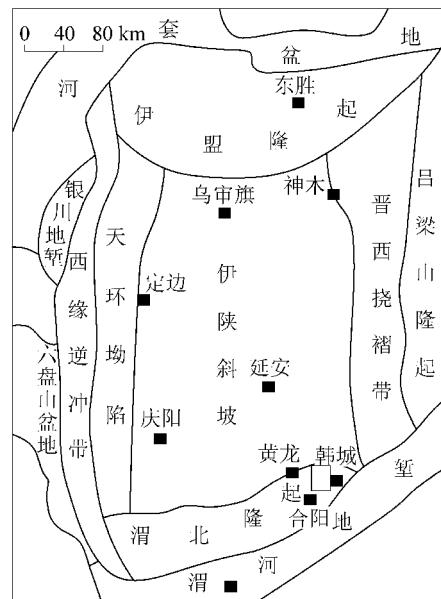


图1 韩城区块位置

Fig. 1 Block location map of Hancheng

在煤层和顶板岩性界面间延伸,大幅度提高低渗透软煤中的裂缝长度,通过压裂形成高速通道,使煤层水以最优的通道渗流进入裂缝,再经裂缝快速流入井筒,显著地增大了压降面积,从而改善了煤层气井的产能效果。

采用间接压裂的方法,裂缝容易在顶板砂岩或煤层毗邻的岩性界面,即在“弱面”附近起裂^[9~10]。裂缝将被限制在“弱面”中并且只在此层中延伸,此时的煤层和顶板成为裂缝扩展的应力遮挡层;若煤层煤体结构为原生结构煤或碎裂煤,裂缝也会在煤层中延伸,因此影响裂缝扩展的主要影响因素是煤层顶板特性和煤体结构,而裂缝拓展的程度决定着间接压裂的效果,因此,影响间接压裂效果的地质主控因素即煤层顶板特性和煤体结构。

2.1 顶板岩性为砂岩

区块山西组5号煤层顶面岩性如图2所示,当煤层顶板岩性为砂岩时,在相同的煤层厚度和煤体结构下,砂体的沉积特征成为影响间接压裂效果的关键因素,主要包括砂体层理、砂体沉积韵律、砂体中泥质夹层、砂体中天然裂隙和砂体含水性。

2.1.1 砂体层理

山西组5号煤层顶板砂岩厚度在0~20 m不等,物性较差,平面上沉积相变化较快,非均质性较强。区块露头显示山西组砂岩斜层理较为发育,利用偶极声波测井、电阻率成像测井资料对砂体层理解释,统计发现该类井累计产气量与顶板砂岩层理

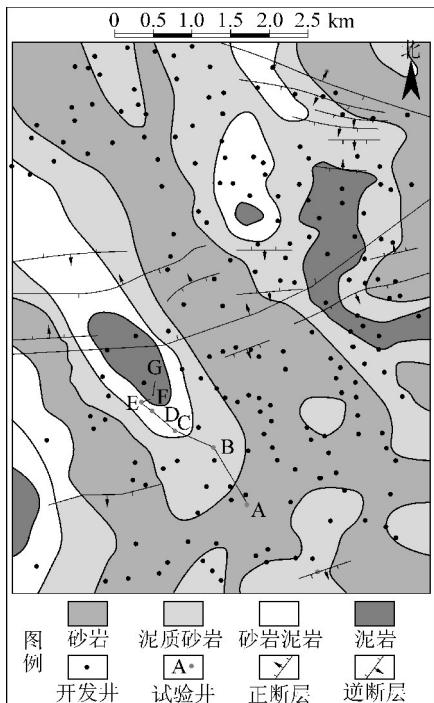


图 2 山西组 5 号煤层顶面岩性平面分布

Fig. 2 No. 5 coal seam roof lithology of Shanxi Formation

线密度呈正相关关系(图 3)。由于区块煤层气井开采连续性较差,单井日产气量的选取不当就直接影响了主控因素的分析,在后续论述中采用累计产气量来表征产能。在区块 700 m 以浅煤层气井,间接压裂裂缝主要以水平缝为主,由于裂缝高度小,主裂缝与煤层接触面积就相对变小,不利于后期排水降压。但因砂体斜层理较为发育,压裂裂缝易在层理中延伸,改善了缝网垂向导流能力,就相对增加了主裂缝与煤层的沟通面积。

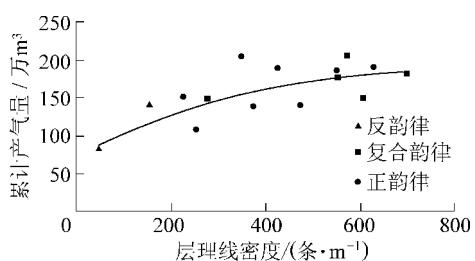


图 3 山西组层理线密度、砂体沉积韵律与累计产气量关系

Fig. 3 Relationships between bedding line density and sandstone rhythm and cumulative gas production

2.1.2 砂体沉积韵律

区块内山西组主要以正韵律和复合正韵律沉积为主,砂体沉积韵律与产气量有一定相关性(图 3)。砂体为正韵律沉积时,累计产气量最高,复合韵律沉积次之,反韵律沉积砂体最低。对区块内部分井的

山西组 5 号煤层压裂前后进行过井温测试(表 1),通过井温测试测得压后井温曲线,利用其拐点和井温异常段来确定裂缝的高度。正韵律沉积砂体裂缝高度小,裂缝主要在煤层与顶板附近延伸,反韵律沉积砂体裂缝高度大,压裂裂缝向上延伸。因此,砂体韵律影响裂缝在垂向上的分布特征。若砂体为正韵律,砂体底部斜层理相对发育,起裂压力相对低(图 4a),则裂缝主要在砂岩底部延伸,由于距煤层(应力遮挡层)近,裂缝高度受限,裂缝长度大,主裂缝与煤层接触面积广,因此产气量高;若为反韵律,裂缝趋向于在砂体顶部延伸(图 4b),裂缝高度较大,裂缝长度短,主裂缝与煤层接触面积小,因此产气量低。

表 1 韩城区块部分井砂体沉积韵律与裂缝高度

Table 1 Some wells' sand body sedimentary rhythm and crack height in Hancheng Block

井号	煤层	煤层深度/m	射孔段/m	顶板砂体韵律	解释裂缝高度/m
A	5	850.5—860.0	848.0—854.0	正韵律	—
B	5	768.1—774.0	767.0—773.0	正韵律	13.2
C	5	829.3—834.0	828.0—833.0	正韵律	8.0
D	5	636.0—644.0	635.0—641.0	反韵律	16.7
E	5	899.1—904.0	897.0—903.0	反韵律	21.6
F	5	959.2—966.0	957.0—963.0	复合韵律	25.0
G	5	847.8—852.1	846.0—852.0	复合韵律	13.3

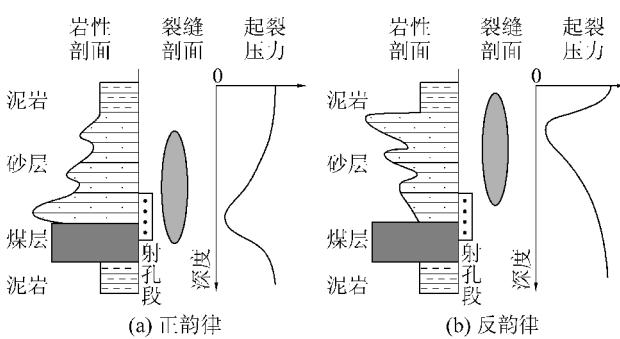


图 4 韩城区块砂体韵律对间接压裂效果的影响示意

Fig. 4 Influence of sandstone rhythm on indirect fracturing in Hancheng Block

2.1.3 砂体中泥质夹层

泥质夹层阻碍压裂裂缝在垂向扩展,减小主裂缝与煤层沟通面积。在具体压裂施工中,表现为地面压力增高。筛选出 11 口地质、工程条件相似的间接压裂井(砂体中泥质夹层发育程度不同),当累计泥质夹层厚度大于 3 m 时,压裂前置液造缝末期净

压力明显偏高,此时累计产气量与累计泥质夹层厚度呈负相关,相关系数为0.45(图5)。

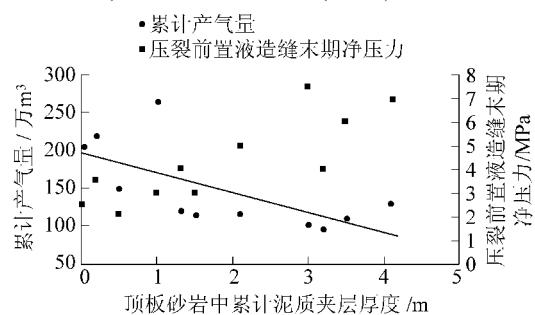


图5 砂体累计泥质夹层厚度与压裂前置液造缝末期净压力和累计产气量关系

Fig. 5 Relationship between cumulative shaly interbed thickness and tail fracturing pressure of pad fluid and cumulative gas production

2.1.4 砂体中天然裂隙

地层构造曲率可以表征天然裂隙的发育和张开程度^[11-12]。区块微电阻率成像测井和偶极阵列声波测井解释资料表明,地层构造曲率越高,天然裂隙越发育,裂隙的张开程度越高(表2)。筛选出43口地质、工程条件相似井(所处构造位置不同),发现砂体天然裂隙发育程度与产气量呈典型的“Y”字型分布(图6)。以山西组为例,当地层构造曲率小于0.0005 m⁻¹时,砂体天然裂隙发育程度与产气量几乎无相关性;当地层构造曲率接近0.005 m⁻¹时,其相关性到达“Y”字型分布分叉点;当地层构造曲率大于0.01 m⁻¹时,在逆断层附近井产气量出奇的高,而位于正断层附近井却无工业气流。

表2 5号煤层顶面地层构造曲率与裂缝线密度关系

Table 2 Relationship between No.5 coal seam roof structural curvature and crack linear density

构造曲率/m ⁻¹	裂缝线密度/(条·m ⁻¹)
>0.005 0	>0.20
0.0005~0.005 0	0.03~0.20
0.0001~0.0005	0.01~0
<0.0001	<0.01

正断层附近砂体中天然裂隙以高角度张裂隙为主,这增加了煤系地层垂向的越流系数,使得煤层含气量降低,对煤层气开发不利^[13-14]。在该区域压裂作业时,压裂液主要滤失到天然裂隙中,裂缝沿着张裂隙在垂向地层方向延伸,裂缝高度远高于天然裂隙不发育地区,裂缝长度非常有限,这种情况下的煤

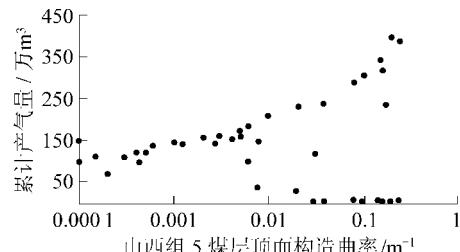


图6 5号煤层顶面地层构造曲率与累计产气量关系

Fig. 6 Relationship between No.5 coal seam roof structural

curvature and cumulative gas production

层气井基本无工业气流。

逆断层附近天然裂隙以低角度剪裂隙为主,这在一定程度上改善了煤储层水平方向的渗透性^[15],间接压裂时,裂缝沿着剪裂隙沿平行地层方向延展,裂缝长度远大于天然裂隙不发育地区,裂缝高度有限。在这种情况下,煤层气井泄流半径几倍于天然裂隙不发育地区井,在小规模(断层延伸距离小于1 km)逆断层附近,部分煤层气井产气量接近常规致密砂岩气井。

2.1.5 砂体含水性

区块内32口井试气资料显示山西组砂体几乎不含气,在钻井过程中,煤层毗邻砂体气测值低,最高气测峰值仅为5%。山西组砂体物性整体较差,岩心分析孔隙度为3%~11%,平均孔隙度6%。筛选出105口地质、工程条件相似的井(砂体含水性不同),通过阿尔奇公式计算出这些井山西组砂体含水饱和度,发现砂体含水饱和度与产气量有一定相关性(图7)。

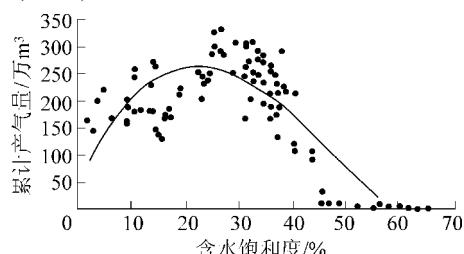


图7 5号煤层顶板砂岩含水饱和度与累计产气量关系

Fig. 7 Relationship between water saturation of roof sandstone of No.5 coal seam and cumulative gas production

当含水饱和度小于20%时,累计产气量整体较低;当含水饱和度介于20%~35%时,累计产气量整体较高,其中在25%附近出现峰值;当含水饱和度约40%时,累计产气量急剧降低,甚至到无工业气流。图7显示累计产气量高的井大多数含水饱和度为25%~35%。

当含水饱和度小于25%时,此时砂体物性差,

孔隙度低,地层水产状以束缚水为主。排采时,地层水渗流途径主要为:煤层水→砂岩中压裂裂缝→井筒;当含水饱和度为25%~35%时,此时砂体物性较好,孔隙度低,地层水产状以自由水和束缚水为主。排采时,地层水主要有2种渗流途径,地层开始缓慢降低过程中,主要遵循第1渗流途径:煤层水→压裂裂缝→井筒,当近井地带地层压力降低到一定程度,在压裂裂缝前端启动第2渗流途径:煤层水→砂岩孔(裂)隙→砂岩中压裂裂缝→井筒。当含水饱和度大于35%时,此时砂体物性好,孔隙度相对较高,地层水产状以自由水为主,间接压裂后,在排采阶段,首先得将砂体中大量自由水排出地层,由于砂体含水性强,这一阶段将极其漫长,根据目前的技术力量,这一阶段时间较长,一般持续3~5年。当近井地带砂体含水饱和度降低至35%以后,启动第1、第2渗流途径。

3.2 顶板岩性为泥岩

当煤层顶板为泥岩或砂质泥岩时,脆性指数可反映泥岩压裂后所形成裂缝的复杂程度。脆性指数较高的储层在压裂时能迅速形成网状裂缝,脆性指数低的储层则容易形成简单的双翼型裂缝^[16]。利

用区块内8口井偶极横波测井资料建立泥岩纵波和横波的时差关系式(1),根据纵波、横波时差得到动态杨氏模量和泊松比^[17],再进行均一化处理,代入式(2)^[18]中得到泥岩的脆性指数为

$$\Delta T_s = 2.481 \Delta T_p - 133.8 \quad (1)$$

$$B = (E_s - \mu_s)/2 \quad (2)$$

式中: ΔT_s 为横波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; ΔT_p 为纵波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; B 为脆性指数; E_s 为均一化后杨氏模量; μ_s 为均一化后的泊松比。

计算得北区块山西组泥岩脆性指数为20~130,优选7口地质、工程条件相似的井进行现场试验,A—F均为间接压裂井,射开顶板比例相近,其中A井顶板岩性为砂岩,B井顶板岩性为泥质砂岩,G井为直接压裂井,C、D、E、F、G井顶板均为泥岩,其脆性指数依次为120、80、60、40、40,G井为直接压裂井(图8)。最后的试验结果如图9所示,按累计产气量由高至低,其间接压裂井顶板岩性依次为砂岩、泥质砂岩和泥岩,当顶板泥岩脆性指数高于40时,间接压裂相比于直接压裂的优势才得以体现。总的来说:顶板岩性为砂岩时,间接压裂产能最好,顶板岩性为泥质砂岩次之,顶板岩性为泥岩效果最差。

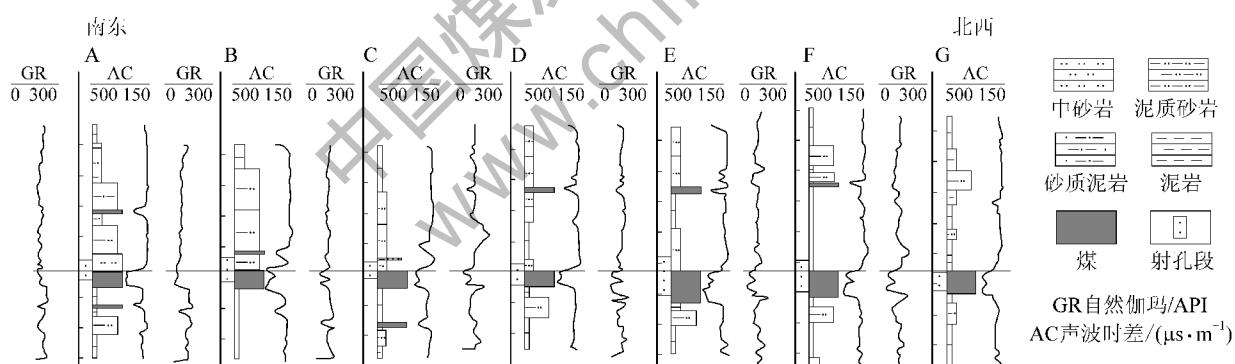


图8 试验井综合柱状

Fig. 8 Synthesis stratigraphic column of experiment wells

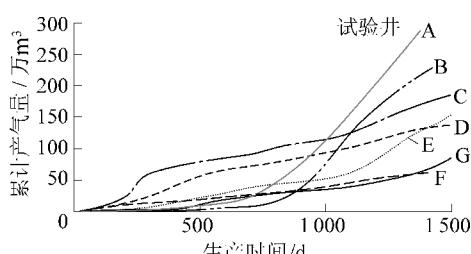


图9 试验井累计产气量曲线

Fig. 9 Cumulative gas production curves of experiment wells

2.3 煤体结构

将区块探井、参数井岩心进行描述对比,划分煤体结构,然后对不同煤体结构及测井响应对比分析,利用聚类分析方法构建煤体结构测井参数判识图版,进而对区块开发井煤体结构进行划分。受构造演化和沉积成岩控制,区块煤体结构以碎粒煤和碎裂煤为主,局部断裂不发育区域存在原生结构煤(图10)。

一般情况下,煤体结构对间接压裂效果的影响

表现在3个方面:①煤体结构越破碎,缝端越不容易产生新的缝面,造成压裂缝延伸较短^[1,19-20];②煤体结构越破碎,压裂过程中产生煤粉和煤泥越多,煤储层伤害越严重^[21-24],影响产气效果;③煤体结构越破碎,煤层垂向导流能力越差,压裂后越不利于煤层水渗流至顶板砂岩裂缝中。

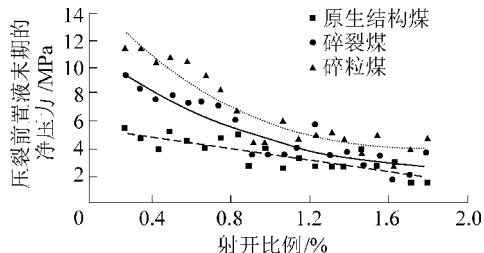


图 10 射开比例及煤体结构与压裂前置液造缝末期净压力的关系

Fig. 10 Relationship between perforation ratio and coal structure and tail fracturing pressure of pad fluid

筛选出140口地质、工程条件相似井(煤层煤体结构不同),用压裂前置液造缝末期净压力高低表征煤储层改造效果,一般情况下,净压力越小,改造效果越好。从煤层射开比例(即射开顶板厚度与射开煤层厚度之比)及煤体结构与净压力之间的关系可以得出,在射开比例较小的情况下,煤体结构越破碎,净压力值越高,随着射开比例的增大,因煤体结构引起净压力的变化越小,所以增大射开比例一定程度上能提高煤储层间接压裂的改造效果。

4 结 论

1)间接压裂技术是提高低渗透软煤压裂改造效果的有效途径。

2)当煤层顶板为砂岩时,影响间接压裂效果的主要因素为层理、沉积韵律、泥质夹层、天然裂隙和砂体含水性。

3)当煤层顶板为泥岩时,泥岩脆性指数大于40,间接压裂增产才有效。

4)根据不同井煤层顶板地层特性和煤体结构,在相同的条件下,增大射开顶板比例可在一定程度上提高间接压裂的改造效果。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 雷毅.松软煤层井下水力压裂致裂机理及应用研究[D].北京:煤炭科学研究院,2014.
- [3] 陈斌.一种通过围岩开采煤层气的方案[J].中国煤层气,1996,1(1):54-55.
Chen Bin. A way to extract coalbed methane through adjacent formation [J]. China Coalbed Methane, 1996, 1(1): 54-55.
- [4] Arnold III W T. Indirect hydraulic fracturing method for an unconsolidated subterranean zone and a method for restricting the production of finely divided particulates from the fractured unconsolidated zone: US, US 6644407 B2[P]. 2003.
- [5] Olsen T N, Bratton T R, Donald A, et al. Application of indirect fracturing for efficient stimulation of coalbed methane[C]//SPE 107985 Presented at the 2007 SPE Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium, Denver, Colorado, USA, 16-18 April, 2007.
- [6] Olsen T N, Galen Brenizer, Taryn Frenzel. Improvement processes for coalbed natural gas completion and stimulation[C]//SPE - 84122-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 5-8 October, 2003.
- [7] 饶孟余,张遂安,商昌盛.提高我国煤层气采收率的主要技术分析[J].中国煤层气,2007,4(2):12-16.
Rao Mengyu, Zhang Suian, Shang Changsheng. Analysis on key techniques to improve CBM recovery in China [J]. China Coalbed Methane, 2007, 4(2): 12-16.
- [8] 张金波,吴财芳.煤层气开采技术应用现状及其改进[J].煤炭科学技术,2012,40(8):88-91,96.
Zhang Jinbo, Wu Caifang. Application status and improvement of coal bed methane development technology [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 88-91, 96.
- [9] 边利恒,熊先锐,王炜彬.低渗透软煤储层压裂改造研究[J].煤炭技术,2017,36(2):185-186.
Bian Liheng, Xiong Xianyue, Wang Weibin. Research on stimulation of low permeability soft coal formation [J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 185-186.
- [10] 朱宝存,唐书恒,张佳赞.煤岩与顶底板岩石力学性质及对煤储层压裂的影响[J].煤炭学报,2009,34(6):756-760.
Zhu Baocun, Tang Shuheng, Zhang Jiazan. Mechanics characteristics of coal and its roof and floor rock and the effects of hydraulic fracturing on coal reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 756-760.
- [11] 苏瑗.新场地区须二段裂缝识别及分布评价[D].成都:成都理工大学,2011:64-65.
- [12] 何巍巍.裂缝性储层预测研究:以川东北嘉陵江组二段储层为例[D].北京:中国地质大学(北京),2010:38-45.
- [13] 吴斌,杨创,王志平,等.断层对煤层气的控气特征[J].硅谷,2009(2):11.
Wu Bin, Yang Chuang, Wang Zhiping, et al. Fault gas controlled features of CBM [J]. Silicon Valley, 2009(2): 11.
- [14] 郑德顺,周璐,李明龙,等.煤层气储存富集主控因素简述[J].中州煤炭,2013(3):23-26,36.
Zheng Deshun, Zhou Lu, Li Minglong, et al. A review on control-

- ling factors of storage and enrichment of coalbed methane [J]. Zhongzhou Coal, 2013(3):23–26,36.
- [15] 李梦溪,刘庆昌,张建国,等.构造模式与煤层气井产能的关系:以晋城煤区为例[J].天然气工业,2010,30(11):10–13,114.
Li Mengxi,Liu Qingchang,Zhang Jianguo,*et al*.Relationship between structural style and CBM well productivity:a case study of the Jincheng coalfield[J].Natural Gas Industry,2010,30(11):10–13,114.
- [16] 付永强,马发明,曾立新,等.页岩气藏储层压裂实验评价关键技术[J].天然气工业,2011,31(4):51–54.
Fu Yongqiang,Ma Faming,Zeng Lixin,*et al*.Keytechniques of experimental evaluation in the fracturing treatment for shale gas reservoirs[J].Natural Gas Industry,2011,31(4):51–54.
- [17] 归榕,万永平.基于常规测井数据计算储层岩石力学参数:以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J].地质力学学报,2012,18(4):418–424.
Gui Rong,Wan Yongping.Rockmechanics parameter calculation based on conventional logging data;a case study of upper Paleozoic in Ordos Basin[J].Journal of Geomechanics,2012,18(4):418–424.
- [18] 袁俊亮,邓金根,张定宇,等.页岩气储层可压裂性评价技术[J].石油学报,2013,34(3):523–527.
Yuan Junliang,Deng Jinggen,Zhang Dingyu,*et al*.Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J].Acta Petrolei Sinica,2013,34(3):523–527.
- [19] 倪小明,陈鹏,李广生,等.恩村井田煤体结构与煤层气垂直井产能关系[J].天然气地球科学,2010,21(3):508–512.
- Ni Xiaoming,Chen Peng,Li Guangsheng,*et al*.Relations between productivity of CBM vertical wells and coal structure in Encun Mine Field [J].Natural Gas Geoscience,2010,21(3):508–512.
- [20] 胡奇,王生维,张晨,等.沁南地区煤体结构对煤层气开发的影响[J].煤炭科学技术,2014,42(8):65–68,74.
Hu Qi,Wang Shengwei,Zhang Chen,*et al*.Coal structure affected to coalbed methane development in Qinnan Region[J].Coal Science and Technology,2014,42(8):65–68,74.
- [21] 赵俊芳,王生维,秦义,等.煤层气井煤粉特征及成因研究[J].天然气地球科学,2013,24(6):1316–1320.
Zhao Junfang,Wang Shengwei,Qin Yi,*et al*.Characteristics and origin of coal powder in coalbed methane well[J].Natural Gas Geoscience,2013,24(6):1316–1320.
- [22] 魏迎春,曹代勇,袁远,等.韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素[J].煤炭学报,2013,38(8):1424–1429.
Wei Yingchun,Cao Daiyong,Yuan Yuan,*et al*.Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng Block[J].Journal of China Coal Society,2013,38(8):1424–1429.
- [23] 陈文文,王生维,秦义,等.煤层气井煤粉的运移与控制[J].煤炭学报,2014,39(S2):416–421.
Chen Wenwen,Wang Shengwei,Qin Yi,*et al*.Migration and control of coal powder in CBM well[J].Journal of China Coal Society,2014,39(S2):416–421.
- [24] 熊先铖.韩城区块煤层气连续排采主控因素及控制措施研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.

(上接第141页)

- [11] 李杰.定向高位长钻孔抽采位置确定及瓦斯治理效果[J].煤炭科学技术,2014,42(12):51–53,58.
Li Jie.Location determination and gas control effect of directional high long hole drilling[J].Coal Science and Technology,2014,42(12):51–53,58.
- [12] 王军,魏国山,闫大为,等.大兴矿顶板岩石水平长钻孔瓦斯抽采技术的应用[J].煤矿安全,2008,39(12):36–38.
Wang Jun Wei Guoshan,Yan Dawei,*et al*.Application of horizontal long borehole gas drainage technology in Daxing Mine[J].Safety in Coal Mines,2008,39(12):36–38.
- [13] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下1 800 m水平定向钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2015,43(2):109–113.
Shi Zhijun,Li Quanxin,Yao Ke.Underground mine 1 800 m horizontal directional drilling technology and equipment[J].Coal Science and Technology, 2015, 43(2):109–113.
- [14] 王灿,梨青海,王国荣,等.冲旋钻井系统能量传递模型分析[J].石油矿场机械,2010,39(3):18–21.
Wang Can,Li Qinghai,Wang Guorong,*et al*.Analysis of energy transfer model of percussive drilling system[J].Oil Field Equipment,2010,39(3):18–21.
- [15] 张海平,索忠伟,陶兴华.新型液动射流冲击器顶紧及密封机构设计[J].石油矿场机械,2011,40(4):44–47.
Zhang Haiping,Suo Zhongwei,Tao Xinghua.Design of a new type of hydraulic jet impactor top and seal mechanism[J].Oil Field Equipment,2011,40(4):44–47.
- [16] 贾涛,徐丙贵,李梅,等.钻井用液动冲击器技术研究进展及应用对比[J].石油矿场机械,2012,41(12):83–87.
Jia Tao,Xu Binggui,Li Mei,*et al*.Research progress and application of drilling fluid percussion device[J].Oil Field Equipment,2012,41(12):83–87.
- [17] 祝效华,汤历平,吴华,等.高频扭转冲击作用下硬地层破岩机理研究[C]//第十届全国振动理论及应用学术会议论文集.南京:中国振动工程学会,2011:896–901.