

文章编号: 0253-2697(2015)S1-0083-08 DOI:10.7623/syxb2015S1010

沁水盆地郑庄区块煤储层水力压裂曲线类型及其地质影响因素

蔡路^{1,2} 姚艳斌¹ 张永平³ 魏宁³ 杨艳磊³ 刘志华¹

(1. 中国地质大学煤层气国家工程中心煤储层实验室 北京 100083;

2. 贵州省地质矿产勘查开发局 115 地质大队 贵州贵阳 550000; 3. 中国石油华北油田公司 河北任丘 062552)

摘要:基于郑庄区块 64 口直井的压裂曲线分析,对水力压裂裂缝的扩展规律进行了总结,深入探讨了水力压裂曲线类型与煤体结构、天然裂缝发育、埋深和构造应力的关系。研究表明:最小水平主应力值较大、裂缝发育情况较差,不利于煤层起裂形成主缝,易形成上升型压裂曲线;最小水平主应力值较低、裂缝发育条件较好时,煤层容易起裂形成主缝,易形成下降型、稳定型和波动 A 型曲线;当垂向主应力与最小水平主应力相差不大时,易同时发育水平缝和垂直缝,形成波动 B 型曲线。大样煤岩压裂模拟实验表明该评价结果具有较好适用性。

关键词:煤层气;水力压裂;曲线类型;储层条件;郑庄区块

中图分类号: TE357.1 **文献标识码:** A

Hydraulic fracturing curve types of coal reservoirs in Zhengzhuang block, Qinshui Basin and their geological influence factors

Cai Lu^{1,2} Yao Yanbin¹ Zhang Yongping³ Wei Ning³ Yang Yanlei³ LiuZhihua¹

(1. Coal Reservoir Laboratory of National CBM Engineering Center, China University of Geosciences,

Beijing 100083, China; 2. No. 115 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guizhou Guiyang 550000, China; 3. PetroChina HuaBei Oilfield Company, HeBei Renqiu 062552, China)

Abstract:Based on analysis of fracturing curves of 64 vertical wells in Zhengzhuang block, propagation laws of hydraulic fracturing fissures were summarized, and relationships between hydraulic fracturing curve types and coal texture, natural fissure development, burial depth, tectonic stressed were deeply discussed. Results show that higher minimum horizontal principle stress and poor development of fissures, are unfavorable for formation of major fissures through coal fracturing, but it is prone to form ascending hydraulic fracturing curve; lower minimum horizontal principle stress and better fissure development conditions, major fissures are easily formed by coal fracturing, and it is prone to form descending, stable and fluctuating A-type curves; when vertical principal stress is no different than minimum horizontal principal stress, horizontal and vertical fissures are well developed, thus forming fluctuating B-type curve. The bulk-sample coal fracturing simulation experiments proved that these evaluation results have better applicability.

Key words: coal bed methane; hydraulic fracturing; curve types; reservoir conditions; Zhengzhuang block

引用:蔡路,姚艳斌,张永平,魏宁,杨艳磊,刘志华. 沁水盆地郑庄区块煤储层水力压裂曲线类型及其地质影响因素[J]. 石油学报, 2015,36(增刊 1):83-90.

Cite: Cai Lu, Yao Yanbin, Zhang Yongping, Wei Ning, Yang Yanlei, LiuZhihua. Hydraulic fracturing curve types of coal reservoirs in Zhengzhuang block, Qinshui Basin and their geological influence factors[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S1): 83-90.

中国煤储层普遍具有低孔、低渗的特点,这使得几乎所有的煤层气井要获得商业气流都必须实施水力压裂^[1]。前人基于常规砂岩水力裂缝扩展模型,通过物模实验和数模分析,初步建立了煤岩水力压裂裂缝扩

展模型^[2,3],认为沁水盆地南部煤储层压裂主要形成复杂的多裂缝,且多以垂直缝为主^[4,5]。然而,很少有学者从煤储层地质特征的角度对后期的压裂效果进行评价和预测。本文在对沁水盆地郑庄地区煤储层压裂

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41472137)、全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(201253)、山西省煤基重点科技攻关项目(MQ2014-01)、国家重大科技专项(2011ZX05061)和中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2013E-2205)资助。

第一作者:蔡路,男,1989年9月生,2012年获长江大学学士学位,2015年获中国地质大学(北京)硕士学位,主要从事煤层气地质与开发的研究工作。Email:421312423@qq.com

通信作者:姚艳斌,男,1978年12月生,2002年获湖南科技大学学士学位,2008年获中国地质大学(北京)博士学位,现为中国地质大学(北京)能源学院教授、博士生导师,主要从事煤层气地质与开发的研究工作。Email:yyb@cugb.edu.cn

曲线类型划分的基础上,从煤储层地质特征的角度深入分析了控制压裂效果的主要地质因素,对郑庄区块不同地质单元的压裂效果进行了预测,以指导该地区煤层气的开发。

1 地质概况

郑庄区块位于沁水盆地南部晋城地区,隶属于华北板块太行隆起带的次级构造——沁水块坳构造单元^[6]。该区块总体构造形态为一马蹄形斜坡,东、西、南3个方向为隆起区,北部与沁水盆地腹部相接;低缓、平行褶皱较为发育,断层不太发育,且规模较小,主要受东部及东南边界寺头正断层和后城腰正断层控制^[7,8]。郑庄区块煤层气开发目标层位为3#煤层。煤层厚度为4.6~6.5 m,平均5.4 m,底部常见一层厚约0.5 m的夹矸。煤层埋深总体呈“中部浅、周缘深”的特点,深度在386~1245 m,平均为877 m,埋藏深度适中。宏观煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主,煤体结构以原生结构为主,部分井位含有一定比例的碎裂煤。煤层含气量普遍较高,分布在0.83~31.44 m³/t,平均20.64 m³/t;受寺头正断层逸散作用的影响,断层附近含气量较低。煤岩孔隙度为0.65%~10.54%,平均4.68%;孔隙以微孔和小孔为主,大孔次之,中孔不发育,微、小孔主要为一端封闭的平行板孔。煤层试井渗透率普遍偏低,在0.01~0.43 mD,平均0.16 mD,横向非均质性较高^[9-11]。基于上述地质背景和煤储层条件,该区块适合运用水力压裂技术以提高煤层气单井产量。

2 压裂曲线类型划分

2.1 压裂曲线类型

综合压裂施工曲线是压裂工艺体系和储层地质特征的综合反映。根据压裂施工曲线中油压的变化型式,可定量求取煤储层破裂压力、裂缝延伸压力和裂缝闭合压力等基本地层参数,油压曲线的变化模式也可反映水力裂缝起裂与延伸过程(图1)。当煤储层起裂形成明显主缝,压裂液沿水力裂缝和微裂隙渗滤,油压将快速下降(模式一);当压裂液向天然裂缝中渗滤,形成新的支缝或导致裂缝转向时,油压呈波峰状先升后降(模式二);当压裂液沿主缝平稳渗滤,注入与滤失动态平衡,油压可基本保持平稳(模式三)。这些参数与曲线类型对于指导压裂方案设计与优化、压裂曲线的划分具有重要意义。

本次研究选取了郑庄区块64口煤层气开发井进行分析(图2)。由于所选井压裂施工层位均为3#煤层,且采用大体相同的压裂施工程序,因此在压裂影响

研究中可不考虑施工工程因素。

根据所选井压裂施工曲线图中油压随排量、砂比的变化规律,将压裂曲线划分为下降型、稳定型、波动型和上升型4种类型(图3)。各类型曲线的比例较为均匀,其中的下降型占32.0%、稳定型占30.7%、波动型占21.3%、上升型占16.0%。

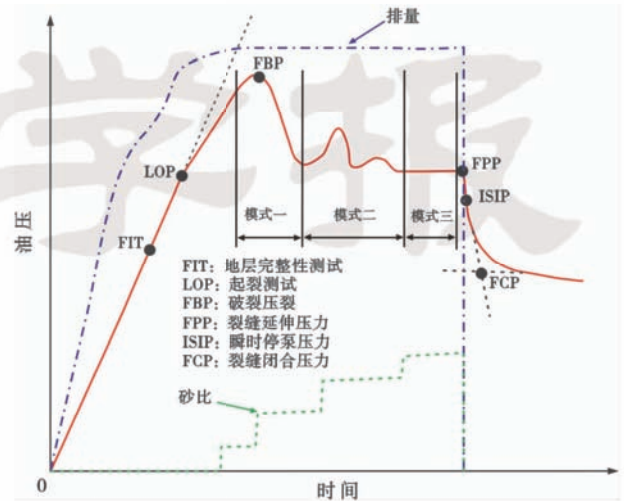


图1 理想压裂曲线中油压变化模式^[12]

Fig. 1 Change model of oil pressure during the ideal hydraulic fracturing process

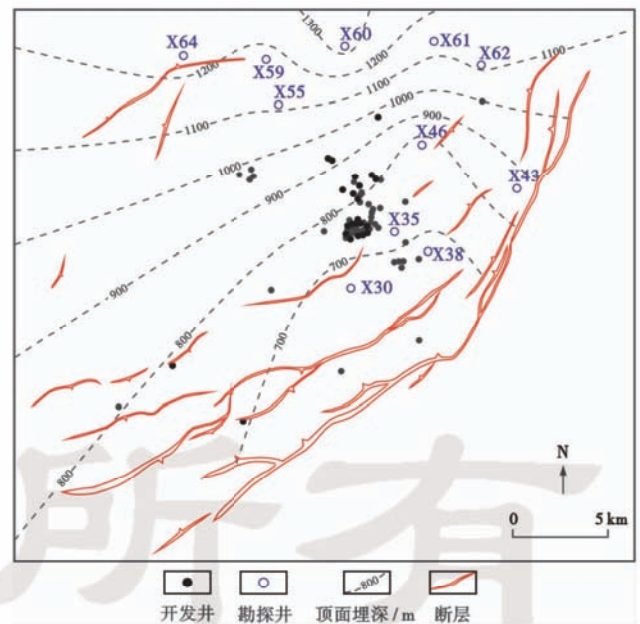


图2 郑庄区块区域地质

Fig. 2 Regional geology of Zhengzhuang CBM field

(1) 下降型压裂曲线。整个过程中排量基本保持稳定,砂比持续增加时,地面油压呈下降趋势。具备该类型压裂曲线的煤层气井有2种情况:①压裂过程中煤层发生明显起裂,压裂液沿主缝渗滤,地面油压总体呈现下降趋势,但是主缝延伸过程中会沟通天然裂缝或形成一些小型支缝,导致油压平缓下降过程中出现

小幅波动,从而形成“下降 A 型”曲线[图 3(a)];②煤层起裂、压裂液沿着人工裂缝和天然裂缝渗滤,油压平缓上升后保持稳定,当压裂液饱和天然裂缝时,会在天然裂缝端部形成一条新的裂缝,此时油压快速下降后保持稳定,从而形成“下降 B 型”曲线[图 3(b)]。

(2) 稳定型压裂曲线。整个过程中排量基本保持稳定,砂比持续增加时,地面油压基本保持稳定。具备该类型压裂曲线的煤层气井有 2 种情况:①煤层在井眼附近发育大量天然微裂隙,且裂隙开启压力较低,压裂时煤岩未发生明显起裂,压裂液直接沿着微裂隙平

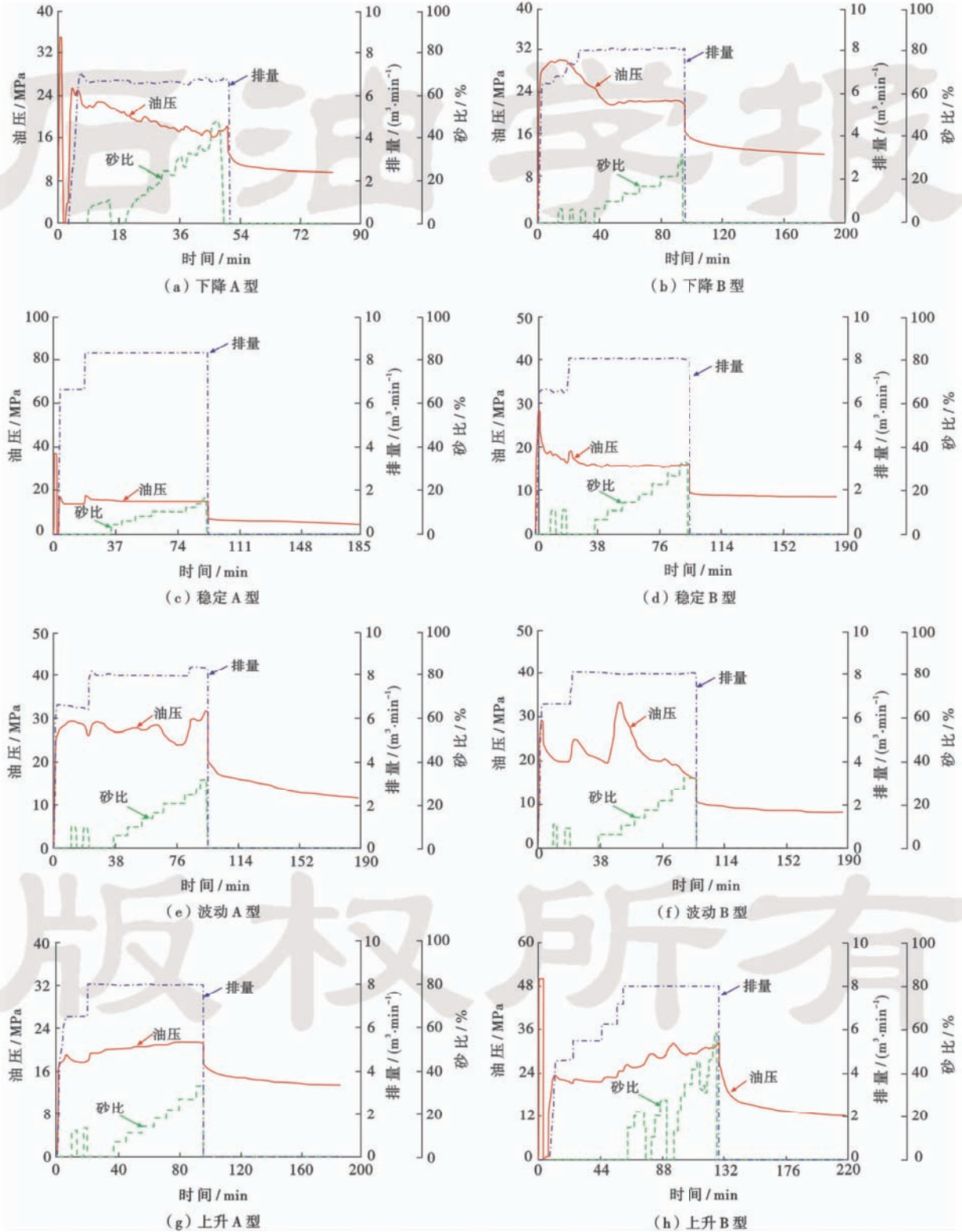


图 3 郑庄区块煤储层压裂曲线分类

Fig. 3 Classification of fracturing curves in Zhengzhuang CBM field

稳渗滤^[13],从而形成地面油压以较低值保持稳定的“稳定 A 型”曲线[图 3(c)];②煤储层较致密,渗透率值很低,地面油压初期快速上升,当压力达到一定值时,煤层发生明显的起裂现象,起裂后油压下降明显^[14],裂缝延伸一定距离后油压基本保持稳定,形成“稳定 B 型”曲线[图 3(d)].

(3) 波动型压裂曲线。整个阶段排量基本保持稳定,砂比持续增加时,地面油压较频繁波动。具备该类型压裂曲线的煤层气井有 2 种情况:①裂缝在井筒附近起裂后,压裂液主要沿着煤层天然裂缝渗滤,地面油压初期会缓慢上升,当裂缝被撑开后,油压缓慢下降^[14],形成“波动 A 型”曲线[图 3(e)];②当煤储层的垂直应力与最小水平主应力相差较小时,压裂有可能在煤层内部和顶、底板的界面处先后形成垂直缝和水平缝,裂缝的整体形态为“T”型或“工”型^[15],地面油压因煤层多、长起裂而出现多个峰值点^[16],呈锯齿状波动,形成“波动 B 型”曲线[图 3(f)].

(4) 上升型压裂曲线。整个阶段排量基本保持稳定,砂比持续增加时,地面油压呈现上升趋势。具备该类型压裂曲线的煤层气井有 2 种情况:①煤层起裂后,裂缝在延伸过程中被支撑剂或煤粉堵塞,地面油压会快速直线上升,形成“上升 A 型”曲线[图 3(g)];②由于煤储层所受应力条件和裂隙发育的非均质性,压裂没有形成明显主缝,而是多条细小裂缝同时起裂并沟通煤层天然裂隙,形成径向网状裂缝,地面油压平缓波动上升^[17],形成“上升 B 型”曲线[图 3(h)].

2.2 裂缝延伸压力梯度

裂缝延伸压力梯度影响地面泵压选择和压裂工艺优化。对于具有相同压裂施工工艺的压裂井而言,裂缝延伸梯度反映了裂缝在储层中延伸的难易程度,可一定程度上反映不同压裂曲线特征。裂缝延伸压力梯

度是目的层最小水平主应力值、目的层压力、压裂液流变性参数、裂缝可塑性、裂缝几何形态和规模等因素的综合反映^[18],可定义为:

$$F_G = \frac{p_F}{H} \quad (1)$$

$$p_F = p_s + p_H \quad (2)$$

式中: F_G 为裂缝延伸压力梯度,MPa/m; p_F 为裂缝延伸压力,MPa; H 为煤层中部埋深,m; p_s 为地面瞬时停泵压力,MPa; p_H 为井筒静液柱压力,MPa。

从压裂曲线类型和裂缝延伸压力梯度之间的关系可以看出,下降型、稳定型裂缝延伸压力梯度较低,上升型、波动型普遍偏高(表 1),整体而言,稳定型<下降型<上升型<波动型。

表 1 不同类型压裂曲线延伸压力梯度值
Table 1 Extending pressure gradients of four types of fracturing curve

曲线类型	裂缝延伸压力梯度/(MPa·m ⁻¹)			井数
	最小值	最大值	平均值	
下降型	0.0228	0.0376	0.0273	15
稳定型	0.0186	0.0469	0.0253	16
波动型	0.0247	0.0546	0.0349	6
上升型	0.0277	0.0402	0.0319	8

3 地质控制因素

在水力压裂过程中,压裂曲线的形态受人工裂缝展布、压裂液运移和煤储层特性等多方面因素的综合影响。根据郑庄区块 11 口勘探井钻井取心结果(图 2),重点剖析了煤体结构、裂隙发育程度和连通性、煤层埋深以及应力环境等地质因素对压裂曲线类型的影响(表 2),并进一步分析了煤储层地质条件与水力压裂类型之间的对应关系。

表 2 勘探井取心观测结果统计

Table 2 Characteristics of cleats and coal structure based on analysis of coring observations of exploration wells

井号	煤体结构	主裂隙			次裂隙			连通性	埋深/m	最小水平主应力/MPa	最小水平主应力梯度/(MPa·hm ⁻¹)	曲线类型
		密度/(0.2条·cm ⁻²)	长度/cm	高度/cm	密度/(0.2条·cm ⁻²)	长度/cm	高度/cm					
X30	碎裂	7~18/12	0.5~7.0	0.5~7.0	5~13/7	0.2~1.5	0.3~4.0	中等—好	530.8	8.9	1.41	波动型 A
X35	原生	9~13/11	0.5~7.0	0.5~10.0	0~7/3	0.2~1.5	—	差—较好	743.9	10.8	1.45	波动型 A
X38	原生	0~19/11	0.5~8.0	0.5~18.0	0~7/4	0.2~6.5	0.5~9.0	中等—好	559.9	11.0	1.67	下降型 A
X43	原生	5~11/7	0.5~7.0	—	0~5/2	0.5~1.5	—	中等	875.6	14.4	1.64	上升型 B
X46	原生	6~22/11	0.3~7.0	0.5~11.0	0~9/5	0.2~6.0	0.0~11.0	—	751.0	13.2	1.76	下降型 A
X55	原生	11~20/15	0.5~5.0	0.5~7.0	4~10/7	0.5~1.5	—	差—中等	1114.5	16.5	1.48	波动型 B
X60	原生	0~18/10	0.5~7.0	0.5~10.0	0~6/4	0.2~1.5	0.5~2.0	中等—好	1338.2	20.1	1.50	稳定型 B
X61	碎裂—原生	8~19/11	0.3~6.0	0.3~7.0	3~12/7	0.2~6.0	0.2~5.0	中等—好	1126.8	17.9	1.59	上升型 B
X62	原生	7~12/9	1.0~7.0	0.5~5.0	0~10/3	0.3~3.0	0.2~1.0	中等—好	1118.8	17.1	1.53	波动型 B
X64	碎裂—原生	3~10/6	0.1~7.0	0.1~8.0	0~5/2	0.1~2.5	—	—	1245.0	19.8	1.59	波动型 B
X76	原生	4~10/7	1.0~4.0	—	0~8/3	0.1~1.0	—	差—中等	514.6	7.2	1.40	下降型 B

注:“/”之后为平均值,“—”表示没有数据。

(1) 稳定型曲线。以 X60 井为例,由于煤层埋藏 1 338.2 m,最小水平应力值很大,导致该井煤层渗透率低,煤岩致密,压裂初期油压会快速上升,当压力达到破裂压力时,煤层明显起裂,形成人工裂缝;同时,煤层裂隙较发育,连通性中等一好,人工裂缝延伸过程中会沟通这些裂隙,导致中期油压快速下降,当裂缝延伸一定距离后压裂液滤失与注入达到动态平衡,地面油压保持稳定,最终形成“稳定 B 型”曲线。

(2) 下降型曲线。对应 2 种储层地质条件:①以 X38 井、X46 井为例,煤层埋藏浅,最小水平主应力较低,煤层裂隙发育条件较好,压裂时煤层明显起裂,随着主缝的延伸,油压持续下降,形成“下降 A 型”曲线;②以 X76 井为例,煤层埋藏较浅,最小水平主应力值较小,压裂可明显起裂,形成主缝,由于裂隙发育条件差,压裂液向裂缝中滤失较少,后期油压可基本保持稳定,形成“下降 B 型”曲线。

(3) 上升型曲线。以 X43 井、X61 井和 X64 井为例,所受最小水平主应力值较大,高围压环境使得压裂

形成的裂缝形态十分复杂^[13],压裂时在井筒周围形成了多条支缝,如 X64 井的裂缝监测结果显示在主缝延伸过程中形成了 3 条支缝[图 4(a)],并沟通煤储层的天然裂缝(表 2),最终形成径向网状缝,地面油压波动上升,形成“上升 B 型”曲线。

(4) 波动型曲线。也对应 2 种储层地质条件:①以 X30 井、X35 井、X55 井为例,其中 X30 井、X35 井埋藏较浅,所受最小水平主应力值很小,井筒周围天然裂缝开启压力较小,裂缝在井眼起裂的同时,压裂液会渗滤到天然裂缝中,压力达到一定值后,在天然裂缝的端部形成新的裂缝,如 X30 井裂缝监测结果显示在井筒周围形成小型支缝[图 4(b)],最终导致地面油压频繁波动形成“波动 A 型”曲线;另外, X55 井虽埋深较大,但天然裂缝极为发育(表 2),压裂也可产生多裂缝,形成“波动 A 型”曲线。②以 X62 井为例,该井埋藏深度和所受最小水平应力均相近,煤储层应力差(最小水平主应力减去垂向主应力)较小,压裂常同时形成垂直缝和水平缝,导致出现多个相近的峰值点,形成“波动 B 型”曲线。

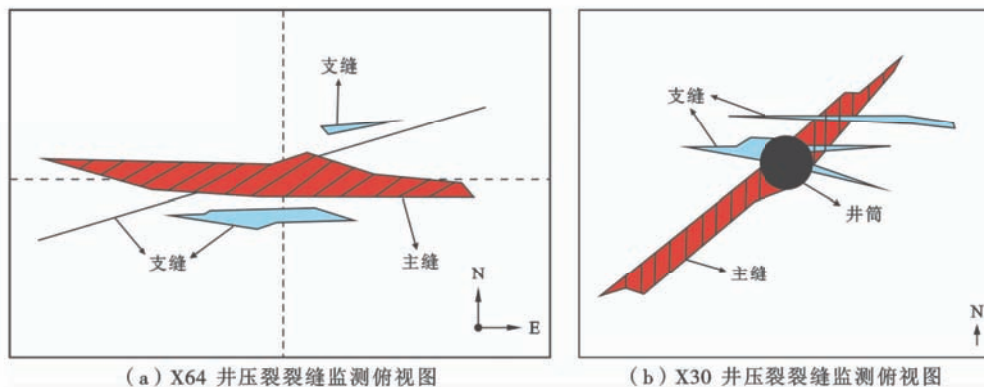


图 4 压裂裂缝监测模拟结果

Fig. 4 In-situ monitoring of the 2D-extending of hydro-fractures in coal reservoirs

4 综合评价与实验验证

4.1 压裂曲线类型综合评价

压裂曲线类型和煤储层地质条件的对应关系分析表明:压裂曲线类型主要受控于煤岩裂隙发育情况和所受最小水平主应力。最小水平主应力值和大尺寸天然裂缝是煤岩起裂形成主缝和裂缝延伸的关键影响因素,小型微裂隙主要影响人工裂缝的延伸过程。因此,以煤岩裂隙发育情况和所受最小水平主应力值作为煤层压前地质评价的主要参数(图 5),并结合煤层埋深条件,对郑庄区块不同地质特征的煤储层压裂效果进行了综合评价和预测。

(1) 当煤储层所受最小水平主应力值较大、天然裂缝发育情况也较差时,压裂时由于起裂困难不能

形成明显主缝,常出现上升型曲线(区域 IV、VII、VIII)(图 5)。(2)在煤储层能明显起裂形成主缝的前提下,裂隙发育条件和连通性相似时,随着最小水平主应力的增加,煤岩压裂曲线依次出现波动 A 型—下降型—稳定型、下降型(图 5);在最小水平主应力值相近情况下,随着天然裂缝发育情况和连通性变差,煤岩压裂曲线依次出现波动 A 型—下降型或直接出现稳定型(图 5)。(3)当煤储层主应力差值较小时,压裂会形成复杂的“T”型或“工”型裂缝,出现波动 B 型曲线。

4.2 压裂模拟实验结果及分析

本次研究中,结合实际的 300 mm × 300 mm 大样模拟实验,以下降 B 型曲线为例进行了实验验证。实验样品(NS)采自牛山矿 3# 煤层,发育几条尺寸较大

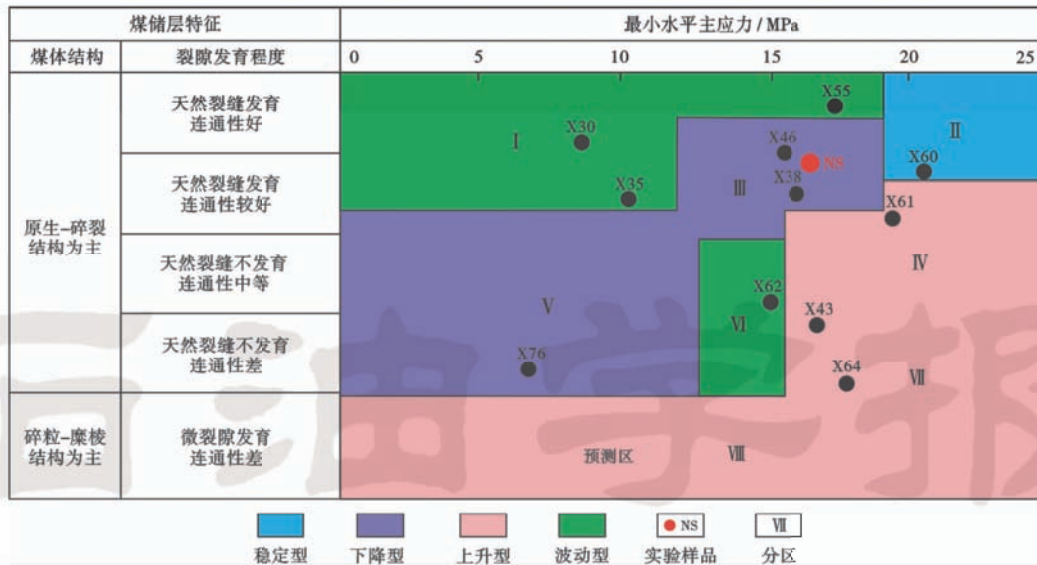


图5 3#煤压裂曲线类型综合评价

Fig. 5 Comprehensive evaluation model of hydraulic fracturing types in the No. 3 coal seam

的天然裂缝[图6(a)];实验中采用石英砂与水泥之比为1:3(质量比)模拟顶、底板,煤岩最小水平主应力、最大水平主应力和垂向主应力分别为16 MPa、20 MPa和19 MPa,模拟煤储层900 m埋深地质条件;压裂液采用黏度为6 MPa·s的压裂液,加入一定量荧光粉示踪剂以便于追踪人工裂缝,压裂液排量恒定为0.33 mL/s。

根据压裂后煤岩中示踪剂的观测结果,该大样在井筒周围形成了一条平行于最大水平主应力方向的双翼垂直缝和一条平行于割理的单翼垂直缝[图6(b)],单翼缝遇天然裂缝后停止延伸,此后,压裂液主要向天然裂缝中渗滤[图6(c)]。压裂模拟实验先后形成了3条主要人工裂缝[图7(a)],与下降B型曲线人工裂缝的形成和延伸过程相似。根据压裂过程中油压实时监测结果[图7(b)],在4.40 min时,煤岩在井筒周围起裂形成主缝后,油压保持平稳;在5.39 min时,先前形成的一条人工裂缝沟通了煤岩的天然裂缝,监测压力

快速下降。油压经历了初期上升、中期保持平稳、后期急剧下降的过程,曲线变化形态与下降B型相似。因此,该大样实验较好模拟了下降B型压裂曲线特征。

实验条件下该样品所受的最小水平主应力值为19 MPa,因发育几条大尺寸天然裂缝,裂隙发育情况总体较好,对应到压裂曲线类型综合评价图版中,该样品位于区域III(图5),为下降型曲线。区域III中在最小水平应力值较大时,若煤岩微裂隙发育,起裂后人工裂缝沟通大量裂隙,压裂液滤失较快,形成下降A型;若天然裂缝发育,起裂后压裂液首先沿人工裂缝渗滤,油压总体保持稳定,当沟通天然裂缝后,压裂液向其中渗滤或在端部再次造缝,导致油压快速下降,形成下降B型。由于NS样品位于区域III中,且最小水平主应力值较大、天然裂缝发育,所以根据压裂类型综合评价图版看到,其为下降B型,该结果与实验模拟结果相吻合,说明上述评价图版具有较好的实用性。

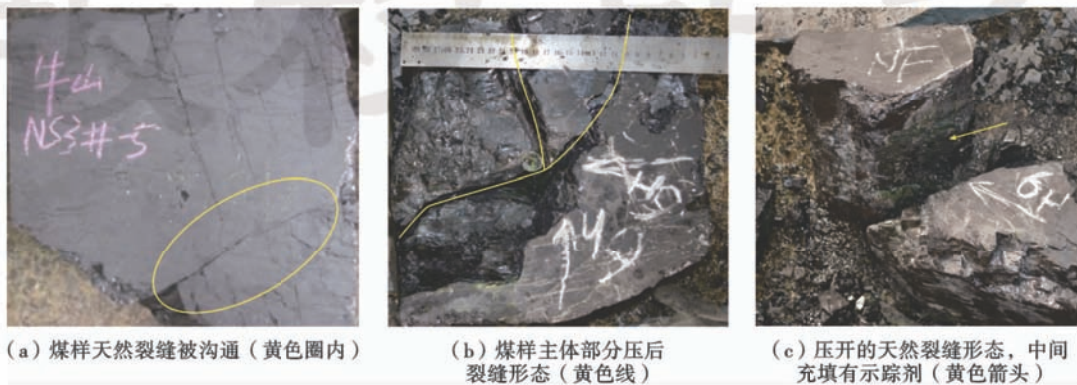


图6 NS煤样宏观特征

Fig. 6 Macrofeature of NS coal sample

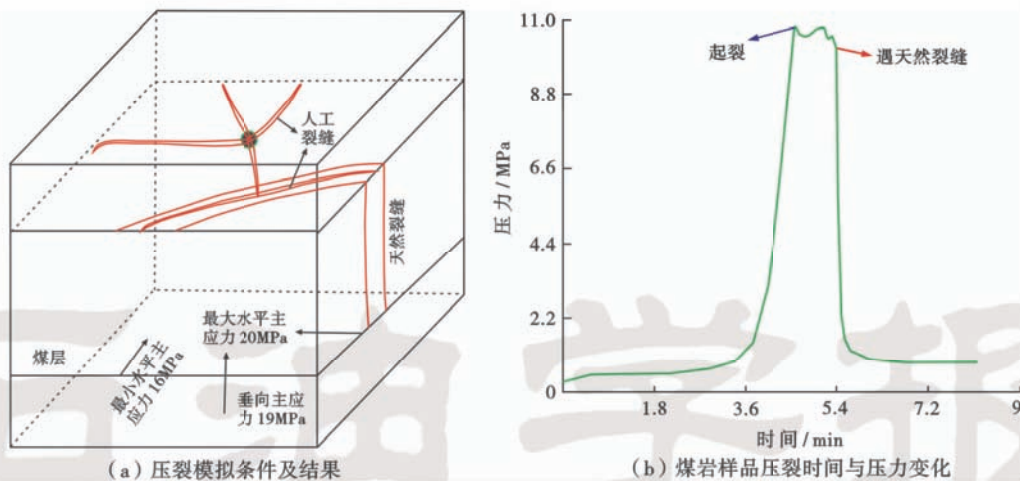


图 7 NS 煤样压裂模拟结果

Fig. 7 In-situ monitoring results of hydro-fractures in NS coal sample

5 结 论

(1) 基于郑庄区块 64 口开发井压裂施工数据,将水力压裂曲线分为 4 类:下降型、稳定型、波动型和上升型;采用裂缝延伸压力梯度来定量表征压裂曲线特征,延伸压力梯度稳定型 \leq 下降型 $<$ 上升型 $<$ 波动型。

(2) 最小水平主应力值较大、裂缝发育情况较差时,不利于煤层起裂形成主缝,易形成上升型曲线;最小水平主应力值较低、裂缝发育条件较好时,煤层容易起裂形成主缝,易形成下降型、稳定型和波动 A 型曲线;埋深适中、垂向主应力与最小水平主应力相差不大时,可形成波动 B 型曲线。

(3) 煤岩压裂模拟实验结果进一步验证了压裂类型与主要地质参数的对应关系;根据煤岩最小水平主应力和裂隙发育情况,可较好预测煤岩压裂类型。

参 考 文 献

[1] 刘贻军. 中国中阶煤和高阶煤的储层特性及提高单井产量主要对策[J]. 天然气工业, 2005, 25(6): 72-74.
Liu Yijun. Reservoir characteristics of medium-high rank coal and main countermeasures to improve gas production of single well[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(6): 72-74.

[2] 孟召平, 侯泉林. 煤储层应力敏感性及其影响因素的试验分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 430-437.
Meng Zhaoping, Hou Quanlin. Experimental research on stress sensitivity of coal reservoir and its influencing factors[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 430-437.

[3] 王晓锋. 煤储层水力压裂裂缝展布特征数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
Wang Xiaofeng. Hydraulic fracturing cracks distribution characteristics of coal reservoir numerical simulation[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.

[4] 单学军, 张士诚, 李安启, 等. 煤层气井压裂裂缝扩展规律分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 130-132.
Shan Xuejun, Zhang Shicheng, Li Anqi, et al. Analyzing the fracture extended law of hydraulic fracturing in coalbed gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 130-132.

[5] 张小东, 张鹏, 刘浩, 等. 高煤级煤储层水力压裂裂缝扩展模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 573-579.
Zhang Xiaodong, Zhang Peng, Liu Hao, et al. Fracture extended model under hydraulic fracturing engineering for high rank coal reservoirs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 573-579.

[6] 山西省地质矿产局. 山西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Shanxi Province. Regional geology of Shanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.

[7] 王猛, 朱炎铭, 李伍, 等. 沁水盆地郑庄区块构造演化与煤层气成藏[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 425-431.
Wang Meng, Zhu Yanming, Li Wu, et al. Tectonic evolution and reservoir formation of coalbed methane in Zhengzhuang block of Qinshui basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(3): 425-431.

[8] 李俊乾, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 郑庄区块煤层气富集主控地质因素及开发前景分析[C]//叶建平, 傅小康, 李五忠. 中国煤层气技术进展——2011 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2011: 187-195.
Li Junqian, Liu Dameng, Yao Yanbin, et al. The main controlling factors and development prospect of coalbed methane in zheng-zhuang block [C] // Ye Jianping, Fu Xiaokang, Li Wuzhong. Technology progress of coalbed methane in china. Proceedings of CBM academic symposium in 2011. Beijing: Geological publishing House, 2011: 187-195.

[9] Liu Huihu, Sang Shuxun, Wang G G X, et al. Block scale investigation on gas content of coalbed methane reservoirs in southern Qinshui basin with statistical model and visual map[J]. Journal

- of Petroleum Science and Engineering, 2014, 114: 1-14.
- [10] Cai Yidong, Liu Dameng, Yao Yanbin, et al. Geological controls on prediction of coalbed methane of No. 3 coal seam in Southern Qinshui Basin, North China[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 88(2/3): 101-112.
- [11] Liu Shiqi, Sang Shuxun, Liu Huihu, et al. Growth characteristics and genetic types of pores and fractures in a high-rank coal reservoir of the southern Qinshui Basin[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 64: 140-151.
- [12] Colmenares L B, Zoback M D. Hydraulic fracturing and wellbore completion of coalbed methane wells in the Powder River Basin, Wyoming; implications for water and gas production[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(1): 51-67.
- [13] 程远方, 徐太双, 吴百烈, 等. 煤岩水力压裂裂缝形态实验研究[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 134-137.
Cheng Yuanfang, Xu Taishuang, Wu Bailie, et al. Experimental study on the hydraulic fractures' morphology of coal bed[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 134-137.
- [14] 赵益忠, 曲连忠, 王幸尊, 等. 不同岩性地层水力压裂裂缝扩展规律的模拟实验[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(3): 63-66.
Zhao Yizhong, Qu Lianzhong, Wang Xingzun, et al. Simulation experiment on prolongation law of hydraulic fracture for different lithologic formations[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Sciences, 2007, 31(3): 63-66.
- [15] 吴晓东, 席长丰, 王国强. 煤层气井复杂水力压裂裂缝模型研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 124-126.
Wu Xiaodong, Xi Changfeng, Wang Guoqiang. The mathematic model research of complicated fractures system in coalbed methane wells[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 124-126.
- [16] 陈添, 汪志明, 杨刚. 煤岩 T 型缝压裂实验及压力曲线分析[J]. 特种油气藏, 2013, 20(3): 123-126.
Chen Tian, Wang Zhiming, Yang Gang. Experiments of fracturing and pressure curve analysis of T-shape fractures of coal bed[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2013, 20(3): 123-126.
- [17] 陈勉, 周健, 金衍, 等. 随机裂缝性储层压裂特征实验研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 431-434.
Chen Mian, Zhou Jian, Jin Yan, et al. Experimental study on fracturing features in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 431-434.
- [18] 蒋廷学. 裂缝延伸压力的现场确定方法研究及应用[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(5): 91-94.
Jiang Tingxue. Study and application of field determining method of fracture extension pressure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(5): 91-94.

(收稿日期 2015-04-02 改回日期 2015-07-22 编辑 王培玺)

(上接第 82 页)

- [22] Blanton T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[R]. SPE 10847, 1982.
- [23] Rahman M M, Hossain M M, Crosby D G, et al. Analytical, numerical and experimental investigations of transverse fracture propagation from horizontal wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2002, 35(3/4): 127-150.
- [24] Baihly J D, Malpani R, Xu J, et al. A comprehensive completion study of recent cotton valley sand well production to optimize future designs[R]. SPE 144412, 2011.
- [25] Wang Yonghui, Fu Haifeng, Liang Tiancheng, et al. Large-Scale physical simulation experiment research for hydraulic fracturing in shale[R]. SPE 172631, 2015.
- [26] Saputelli L, Lopez C, Chacon A, et al. Design optimization of horizontal wells with multiple hydraulic fractures in the Bakken shale[R]. SPE 167770, 2014.
- [27] Ganpule S, Cherian B, Gonzales V, et al. Impact of well completion on the uncertainty in technically recoverable resource estimation in Bakken and three forks[R]. SPE 167131, 2013.
- [28] 才博, 张以明, 金凤鸣, 等. 超高温储层深度酸压液体体系研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(1): 69-72.
Cai Bo, Zhang Yiming, Jin Fengming, et al. Research on acid fracturing system with improving stimulated reservoir volume[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(1): 69-72.
- [29] Ding Yunhong, Zhao Xianzheng, Cai Bo, et al. A novel massive acid fracturing technique with improving stimulated reservoir volume in HTHP reservoir in China[R]. SPE 172771, 2015.
- [30] 才博, 丁云宏, 卢拥军, 等. 复杂人工裂缝网络系统流体流动耦合研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 491-495.
Cai Bo, Ding Yunhong, Lu Yongjun, et al. Optimizing fluid flow coupling in complex artificial fracture network systems[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(3): 491-495.
- [31] Cipolla C L, Lolon E P, Mayerhofer M J, et al. Fracture design considerations in horizontal wells drilled in unconventional gas reservoirs[R]. SPE 119366, 2009.
- [32] Bunger A P, Zhang Xi, Jeffrey R G. Parameters affecting the interaction among closely spaced hydraulic fractures[R]. SPE 140426, 2012.

(收稿日期 2015-04-02 改回日期 2015-07-27 编辑 王培玺)