

暂堵均衡压裂技术在临兴深煤层储层改造中的应用

蒋新立, 常云超, 贾光亮*

(中石化华北石油工程有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 临兴区块定向井纵向上发育多套煤层系, 非均质性强, 常规压裂工艺因无法实现储层均匀改造, 导致高渗层段过度扩展而低渗层段改造不足, 严重影响开发效果。通过合理优化区块 LX36-XXD 井压裂设计参数, 使用可溶绳结暂堵球实现暂堵压裂, 暂堵后施工压力上涨明显, 验证了压裂方案设计的合理性。裂缝形态模拟表明, 加入暂堵剂后, 8、9 号煤层均得到有效改造, 暂堵均衡压裂效果明显, 压裂有效改造体积 SRV 提高了 18.2%, 初产达 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 验证了暂堵均衡压裂对非均质性强储层的适应性, 展现出显著的技术优势, 为深部煤层气高效开发提供了重要技术参考, 未来可进一步探索其在水平井密切割压裂中的推广价值。

关键词: 储层改造; 暂堵均衡压裂; 深部煤层气; 绳结暂堵球; 裂缝形态

中图分类号: TE377; P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)05-0127-07

Application of temporary plugging and balanced fracturing technology in the reservoir stimulation of Linxing deep coalbed

JIANG Xinli, CHANG Yunchao, JIA Guangliang*

(Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: In the Linxing Block, multiple coalbed series with strong heterogeneity are vertically developed in directional wells. Conventional fracturing technology fails to achieve uniform reservoir stimulation, leading to over-expansion of high-permeability intervals and insufficient stimulation of low-permeability intervals, which seriously affects development efficiency. By reasonably optimizing the fracturing design parameters of Well LX36-XXD in the block, soluble knot-type temporary plugging balls were used to realize temporary plugging fracturing. After temporary plugging, the construction pressure increased significantly, verifying the rationality of the fracturing scheme design. The fracture morphology simulation showed that after adding temporary plugging agents, both No.8 and No.9 coal seams were effectively stimulated, with obvious temporary plugging balanced fracturing effects. The effective stimulated reservoir volume (SRV) increased by 18.2%, and the initial production reached $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. This verifies the adaptability of temporary plugging balanced fracturing to reservoirs with strong heterogeneity, demonstrating significant technical advantages. It provides an important technical reference for the efficient development of deep coalbed methane, and its promotion value in tight-cut fracturing of horizontal wells can be further explored in the future.

Key words: reservoir stimulation; temporary plugging balanced fracturing; deep coalbed methane; knot-type temporary plugging balls; fracture morphology

0 引言

当前, 非常规气的开发面临储层非均质性强、

常规压裂改造不充分等难题, 压裂时裂缝优先扩展至高渗层段, 而低渗层段改造不充分, 严重影响整

收稿日期: 2025-07-10; 修回日期: 2025-08-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.05.017

第一作者: 蒋新立, 男, 汉族, 1974 年生, 高级工程师, 勘察工程专业, 主要从事钻完井技术研究与实践应用工作, 河南省郑州市中原区中原西路 188 号郑煤大厦, 307261582@qq.com。

通信作者: 贾光亮, 男, 汉族, 1983 年生, 高级工程师, 油气井工程专业, 主要从事储层改造及增产技术研究与实践应用工作, 河南省郑州市中原区中原西路 188 号郑煤大厦, jglly@126.com。

引用格式: 蒋新立, 常云超, 贾光亮. 暂堵均衡压裂技术在临兴深煤层储层改造中的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 127-133.

JIANG Xinli, CHANG Yunchao, JIA Guangliang. Application of temporary plugging and balanced fracturing technology in the reservoir stimulation of Linxing deep coalbed[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 127-133.

体开发效果。暂堵均衡压裂技术通过暂堵剂的定向封堵,迫使压裂液转向未充分改造层段,实现段内多层的均匀进液与裂缝扩展。该技术不仅能提升储层整体改造体积(SRV),还可通过复杂缝网形成增强导流能力,已成为非常规储层压裂的关键手段。

临兴区块位于伊陕斜坡北部东段与晋西挠褶带北段西缘,构造平缓,发育有一定的局部构造和断裂。区块面积为2619 km²。主要目的层:上古生界太原组(2层)、山西组(2层)、石盒子组(8层)、石千峰组(5层),17个气层组。

随着临兴区块深部煤层气开发的深入,各种压裂工艺手段越来越受到重视^[1]。针对纵向上多套层系、非均质性较强的储层,常规压裂工艺手段因不能形成有效复杂缝网、改造针对性不强、无法实现均匀改造,已不能满足储层改造的需要^[2-5]。暂堵均衡压裂工艺技术因暂堵效果明显,能够实现段内多层均有效充分改造逐渐被应用推广^[6]。本文以LX36-XXD井实施暂堵均衡压裂为例,结合8、9号煤层煤体结构特征,设计采用滑溜水较大规模体积压裂,扩大泄气面积;采用“较大排量+高黏液+多级粉砂段塞”等综合措施,加强近井裂缝处理,形成“主裂缝”通道,控近扩远,形成近井简单、远井复杂的裂缝网络;采用70/140目、40/70目、30/50目石英砂组合,前期裂缝处理,打磨降滤,中期连续加砂,后期支撑主缝,实现主缝、支缝和微缝多级支撑,满足储层降滤造缝和裂缝支撑需求;为充分改造各小层,8、9号层压裂中途投入可降解绳结暂堵剂,实现了有效的缝间暂堵,提高了液体效率。结果表明,暂堵均衡压裂技术对非均质性强储层的适应性展现出显著的技术优势,为深部煤层气高效开发提供了重要技术参考。

1 LX36-XXD井基本情况

LX36-XXD井是临兴区块的一口定向开发井,构造处于背斜翼部,测录井显示钻遇山西组、太原组、本溪组煤层。山西组深灰、灰黑色泥岩,灰黑色碳质泥岩与灰色泥质粉砂岩,灰色细砂岩组成不等厚互层,夹黑色煤层;与下伏太原组呈局部冲刷不整合接触;太原组深灰、灰黑色泥岩,灰黑色碳质泥

岩,黑色煤层,灰色细砂岩,灰色泥灰岩,呈略等厚互层,与下伏本溪组呈整合接触;本溪组主要为深灰、灰黑色泥岩,灰黑色碳质泥岩、灰色泥灰岩夹灰色细砂岩,顶部发育一套黑色煤层,与下伏马家沟组呈区域平行不整合接触。完钻层位马家沟组,完钻井深2426 m。该井二开采用 $\varnothing 114.3\text{ mm}\times 6.35\text{ mm}$ 的P110钢级套管固井完井,套管下深2423.89 m。前期采用机械分压工艺对该井致密气盒4段、盒2段进行了压裂试气作业,累计排液317.8 m³,返排率43.58%,氯根稳定在13294 mg/L,黏度1 mPa·s,压后火焰高度1.5~2.0 m,瞬时产气4901 m³/d。本次下入膨胀管封堵盒4段、盒2段,套管补贴完成后,下返对8、9号深煤层进行压裂排采。

1.1 煤层特征

根据测井数据计算煤层GSI值来判断煤层煤体结构,见表1。预测LX36-XXD井8、9号煤层实测含气量为19~20 m³/t。

表1 LX36-XXD井煤层及煤体结构划分数据
Table 1 Coal seam and coal body structure classification data of Well LX36-XXD

编号	顶斜深/m	底斜深/m	厚度/m	GSI值	煤体结构
8	2280.8	2288.2	7.4	67.2	原生-碎裂
9	2304.4	2317.6	9.8 2.9	58.2 51.1	碎裂

1.2 测井解释

LX36-XXD井煤层测井解释数据如表2所示。该井钻遇8号煤层垂厚5.8 m/1层,9号煤层垂厚10.0 m/2层,8号煤与9号煤垂距12.9 m;8号煤层煤体结构为原生-碎裂结构,9号煤层煤体结构为碎裂结构。8、9号煤层段厚度较大,含气量较高,具有较高的改造潜力。

1.3 固井质量

LX36-XXD井人工井底位置为2394.05 m,8、9号煤层压裂井段斜深分别为2280.8~2288.2、2304.4~2317.6 m,8、9号煤层上部50 m至人工井底固井质量均为优,能够满足压裂施工要求。

1.4 压裂及射孔层位

LX36-XXD井压裂及射孔数据如表3所示。

表 2 LX36-XXD 井测井解释数据
Table 2 Logging interpretation data of Well LX36-XXD

煤层 编号	顶斜 深/m	底斜 深/m	测厚/ m	顶垂 深/m	底垂 深/m	垂 厚/m	气测 值/%	深感应/ ($\Omega\cdot\text{m}$)	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	中 子/%	声波/ ($\text{us}\cdot\text{ft}^{-1}$)	伽马值/ API	解释 结果
8	2280.8	2288.2	7.4	1825.7	1831.5	5.8	25.78	297.6	1.49	54.2	106.2	82.6	煤层
9	2304.4	2314.2	9.8	1844.4	1852.1	7.7	7.44	340.4	1.58	55.1	104.7	112.3	煤层
	2314.7	2317.6	2.9	1852.5	1854.8	2.3	14.48	255.0	1.85	54.0	105.5	259.2	煤层

表 3 LX36-XXD 井压裂及射孔数据
Table 3 Fracturing and perforation data of Well LX36-XXD

压裂层位	煤层斜深/m	垂厚/m	接箍位置/m	射孔井段/m	射孔厚度/m
8	2280.8~2288.2	5.8	2289.23、2277.95	2283.0~2285.0	2.0
9	2304.4~2317.6	10.0	2322.74、2311.57、2300.40	2306.0~2309.0	3.0

2 压裂方案设计

2.1 压裂主要设计思路

(1) 针对 8 号煤垂厚 5.8 m/1 层、9 号煤垂厚 10.0 m/2 层,储层厚度较大,含气量高达 19 m³/t,设计采用“高排量较大规模注入+变黏滑溜水造缝携砂+全尺度裂缝支撑+段内暂堵转向+造复杂缝网”为核心的体积压裂技术。加强近井裂缝处理,形成“主裂缝”通道,控近扩远,形成 2 条裂缝均衡扩展的复杂裂缝网络^[7]。

(2) 考虑降滤造缝和裂缝支撑的需求,采用 70/140 目、40/70 目、30/50 目石英砂组合。前期裂缝处理采用 70/140 目石英砂段塞式加砂,打磨降滤,中期采用 40/70 目石英砂连续加砂,后期使用 30/50 目支撑主缝,实现主缝、支缝和微缝多级支撑。

(3) 为确保裂缝均衡扩展,施工中途投入可满足低温条件(50~60 ℃)控制溶解的可溶柔性绳结暂堵剂实现暂堵压裂^[8]。

(4) 为保证施工的连续,采用低伤害的一体化可变黏压裂液体系,在线变黏,满足造缝、携砂需求。同时根据煤层温度介于 55 ℃左右,要求一体化可变黏滑溜水体系在此温度下 1.0 h 彻底破胶。为预防压裂施工压力高,压不开地层,要求变黏滑溜水降阻率>70%^[9-10]。

2.2 岩石力学及施工压力预测

2.2.1 岩石力学分析

利用 LX36-XXD 井测井数据计算 8、9 号煤岩石力学参数及应力剖面,8 号煤层目的层和上、下隔层应力差分别为 4.24、4.80 MPa;9 号煤层目的层和上、下隔层应力差分别为 5.15、3.45 MPa,均可以起到一

定的遮挡作用。压裂目的层和上、下泥页岩层应力、应力差、杨氏模量和泊松比计算结果见表 4。

表 4 LX36-XXD 井 8、9 号煤岩石力学参数计算
Table 4 Rock mechanical parameters calculation of 8[#] and 9[#] coal seams in Well LX36-XXD

煤层 层位	隔层	应力/ MPa	应力差/MPa	杨氏模 量/GPa	泊松 比
8 号	上隔层	32.43	4.24	58.94	0.30
	产层	26.67	/	4.50	0.35
	下隔层	31.87	4.80	55.13	0.30
9 号	上隔层	31.74	5.15	57.83	0.30
	产层	26.59	/	5.61	0.33
	下隔层	30.04	3.45	54.25	0.28

2.2.2 施工压力预测

LX36-XXD 井井口最高限压值宜满足计算预测施工压力的 1.25 倍,且不超过设备的额定工作压力及套管抗内压的 80%。预测该井施工最高压力为 43.42 MPa,压裂井口额定工作压力 10000 PSI(70 MPa),考虑安全余量等因素,施工泵压限压为 58.00 MPa,泵注施工管线最高试压至 65.00 MPa,见表 5。

2.3 支撑剂优选

根据压裂目的层闭合压力梯度计算,LX36-XXD 井 8 号煤闭合压力约 42.1 MPa,9 号煤层闭合压力约 42.7 MPa,考虑提高不同尺度裂缝导流能力,主体采用 70/140 目石英砂与 40/70 目石英砂组合支撑剂,尾追 30/50 目石英砂进行封口。石英砂性能参数如表 6 所示。

表 5 LX36-XXD 井 8、9 号煤层施工压力预测数据
Table 5 Predicted fracturing pressure data of Well LX36-XXD

垂深/m	排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	破裂压力/ MPa	摩阻压力/ MPa	液柱压力/ MPa	井口压力/ MPa	套管限压/ MPa	试压/ MPa	水马力/ hp
1854.8	14	37.10	22.43	18.55	40.98	58.0	65.0	21344
	15		24.87		43.42			
	16		27.91		46.46			

表 6 石英砂性能参数
Table 6 Quartz sand performance parameters

产品类型	技术要求	石英砂/目		
产品规格	SY/T5108 —2014	70/140	40/70	30/50
体积密度/(g·cm ⁻³)	/	1.49	1.50	1.50
视密度/g/cm ³	/	2.60	2.64	2.61
破碎率/%	≤9%	7.80	7.00	8.70
圆度	≥0.6	0.76	0.77	0.62
球度	≥0.6	0.77	0.73	0.71
浊度/FTU	≤150	89.00	94.00	99.00
酸溶解度/%	≤7	6.00	6.00	6.00

2.4 可变黏滑溜水体系优选

2.4.1 体系优选思路

(1)滑溜水配方应尽量简单,减少有机添加剂的使用,减小有机添加剂在煤层的吸附伤害^[7];

(2)降低施工摩阻是中深煤层压裂泵注的关键因素,要求压裂液具有良好的降阻性能;

(3)储层保护是压裂改造的重要内容,压裂液应具有良好的黏土稳定能力,防止水敏对储层渗透率的伤害;

(4)为满足大排量施工,一体化变黏压裂液体系统通过直接在混砂车进行不同浓度调整实现低黏、中黏、高黏液体在线切换,降阻率达70%以上^[11],具有免混配、可根据施工需要实时变黏、易操作、安全环保等特点,从而提高压裂施工效率。

2.4.2 体系配方及性能

基于压裂层段的地温梯度、储层物性特征及黏土矿物组分等关键参数,遵循压裂液体系统优选原则,通过精准调配减阻剂、防膨剂、助排剂和破胶剂的浓度配比,形成具有变黏度特性的滑溜水压裂液体系统,详细配方见表7。实现低、中、高黏度压裂工作液的实时在线转换,具体性能参数详见表8。

表 7 可变黏滑溜水体系配方

Table 7 Formula of variable viscosity slickwater system

名 称	规格/ (kg·袋 ⁻¹)	滑溜水剂量比例/%		
		低黏	中黏	高黏
压裂用减阻剂	1000	0.15	0.4	0.6
压裂用防膨剂	1000	0.2	0.2	0.2
压裂用助排剂	1000	0.2	0.2	0.2
压裂用破胶剂	1000	0.2	0.4	0.6
压裂用破胶促进剂	1000	0.1	0.2	0.4

表 8 可变黏滑溜水体系性能

Table 8 Performance of variable viscosity slickwater system

序号	项 目	指 标
1	pH	6~9
2	表观黏度/ (mPa·s)	低黏 ≥5
		中黏 ≥20
		高黏 ≥40
3	降阻率	≥70
4	降阻变化率/%	≤5
5	基质渗透率伤害率/%	≤15
6	残渣含量/(mg·L ⁻¹)	<10
7	配伍性	室温和储层温度下均无絮凝现象,无沉淀产生 (甲方作业现场提供用水)
8	基质渗透率伤害率/%	≤15
9	破胶时间/min	≤120
10	破胶液表面张力/(mN·m ⁻¹)	≤28
11	30℃破胶液表观黏度/ (mPa·s)	<3
12	破胶液防膨率/%	≥80

2.5 可降解可溶绳结暂堵球优选

预测 LX36-XXD 井 8、9 号煤层温度约 55℃,暂堵设计考虑优选溶解温度在 50~60℃低温暂堵材料。为了确保暂堵合层压裂工艺的实施,压裂过程中使用可溶柔性可溶绳结暂堵球实现暂堵压裂^[12]。

暂堵球粒径:射孔孔径 11.6 mm, 穿透深度达 950 mm, 考虑压裂过程中扩径效应, 选用暂堵球的粒径为 20 mm。其性能指标要求见表 9。

表 9 绳结暂堵材料性能指标要求

Table 9 Performance indicator requirements for knot-type temporary plugging material

粒径/ mm	密度(不含球 壳)/(g·cm ⁻³)	使用温 度/°C	暂堵承压 能力/MPa	最终(96 h) 溶解率/%
18~20	1.1±0.1	35~60	≥30	≥90

可溶绳结暂堵球数量:8、9号煤层压裂段总射孔孔眼数为 80 个, 投入可溶绳结暂堵球数量:总射孔数×射孔有效率×封堵率=80×0.85×0.5=34 颗, 设计暂堵球数为 34 颗。

将承压试验后的暂堵球放入清水中, 55 °C 条件下, 8 h 暂堵球颗粒表面部分软化溶解, 溶液起黏, 60 h 全部溶解。满足压裂下投产前全部溶解的要求, 不会对井筒内工具和管柱造成影响。

3 现场实施及压后分析

3.1 现场实施情况

结合该井储层特征, 按照压裂设计方案对该井 8、9 号煤层进行了环空大排量加砂体积压裂施工, 累计入地层净液量 2298.7 m³、入地层混砂液量 2485.5 m³、加砂量 339.8 m³、施工排量 15.0 m³/min、平均施工压力 43~47 MPa, 整个施工过程顺利, 各项施工参数达到了设计要求。从施工曲线(图 1)可以看出, 施工中途投入暂堵球 34 颗后, 地层破裂压力上涨至 56.3 MPa, 开启新缝, 压开地层后, 压力稳定在 47 MPa 左右, 与投暂堵球前相比, 施工压力上涨 2.4 MPa, 暂堵效果明显。

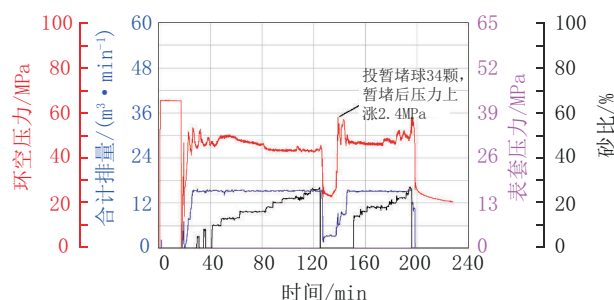


图 1 LX36-XXD 井 8、9 号煤层压裂施工曲线

Fig.1 Fracturing operation curve of 8# and 9# coal seams in Well LX36-XXD

压后采用 2 mm 油嘴开井放喷, 套压 17.8 MPa, 黏度 2 mPa·s, 氯根含量 709 mg/L。采用 4 mm 油嘴套管返排, 08:00 套压降至 4.8 MPa, 点火可燃, 火焰高度 0.3~0.5 m, 返排率 4.16%, 氯根含量 9749 mg/L, 压后初产达 0.8×10^4 m³/d, 压裂改造效果明显。

3.2 压后效果分析

采用压裂软件对未暂堵和施加暂堵后裂缝形态模拟, 估算其压裂改造体积^[13-15], 结果如表 10、图 2、图 3 所示。从图中可以看出, 未加暂堵剂时, 下部 9 号煤层形成主缝, 储层得到充分改造, 上部 8 号煤层缝长较短, 未有效铺砂, 储层改造不充分; 加入暂堵剂后, 下部 9 号煤层和上部 8 号煤层缝长相差不大, 均能够有效铺砂, 两条缝得到充分改造。

表 10 LX36-XXD 井 8、9 号煤层暂堵前后裂缝参数数据对比

Table 10 Comparison of fracture parameters before and after temporary plugging in 8# and 9# coal seams of Well LX36-XXD

层	位	裂缝参数/m		
		支撑缝长	支撑缝高	裂缝宽度
暂堵前	8号煤层	139.7	7.810	2.661
	9号煤层	174.8	12.990	3.464
暂堵后	8号煤层	156.9	7.210	3.071
	9号煤层	167.0	13.620	2.861

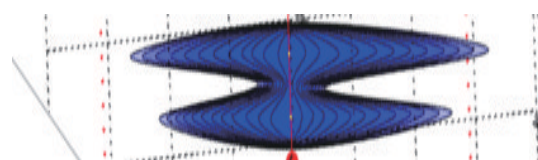


图 2 压裂监测效果评价

Fig.2 Evaluation of fracturing monitoring effect

暂堵前后压裂改造体积广域电磁监测结果显示(图 4), 暂堵前后压裂改造总体积分别约为 0.49×10^6 、 0.58×10^6 m³, 暂堵后压裂改造体积相比暂堵前提高 18.2%。

4 结论与认识

(1) 通过合理优化岩石力学、施工压力、压裂液体系、支撑剂组合及可溶性绳结暂堵球, 整个压裂施工过程安全顺利, 各项施工参数达到设计要求, 验证了压裂方案设计的合理性。

(2) 施工中途投入暂堵球 34 颗, 地层破裂压力

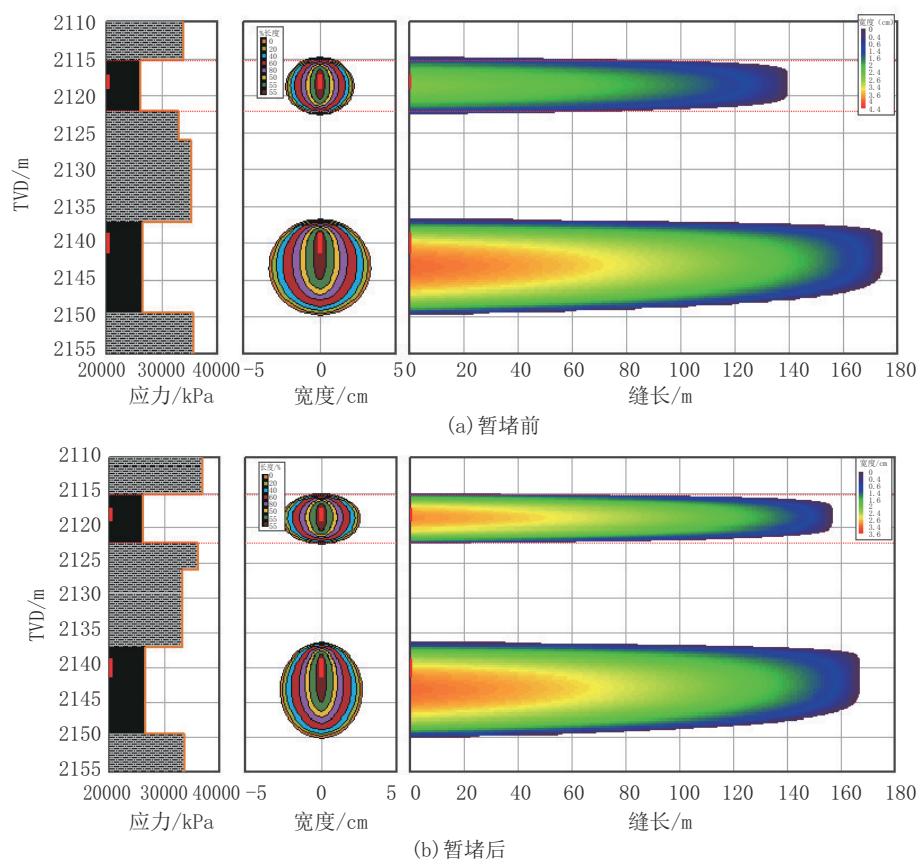


图3 LX36-XXD井8、9号煤层暂堵前后裂缝模拟形态

Fig.3 Fracture simulation morphology diagram of 8[#] and 9[#] coal seams in Well LX36-XXD before and after temporary plugging

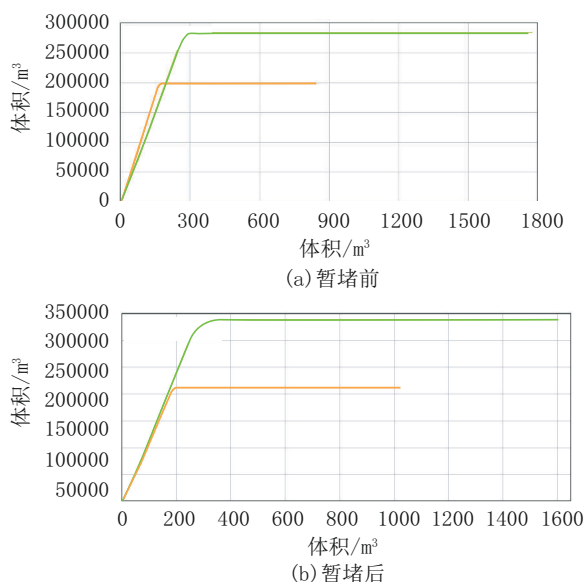


图4 LX36-XXD井8、9号煤层暂堵前后
体积波及改造示意

Fig.4 Schematic diagram of stimulated volume coverage
before and after temporary plugging in 8[#] and 9[#]
coal seams of Well LX36-XXD

上涨至56.3 MPa,表明暂堵转向开启了新缝。新缝地层压开后,压力稳定在47.0 MPa左右,与投暂堵球前相比,施工压力上涨2.4 MPa,表明暂堵效果明显。

(3)裂缝形态模拟表明,未加暂堵剂时,下部9号煤层形成主缝,储层得到充分改造,上部8号煤层缝长较短,未有效铺砂,储层改造不充分;加入暂堵剂后,下部9号煤层和上部8号煤层缝长相差不大,均能够有效铺砂,储层均得到有效改造,暂堵均衡压裂效果明显。

(4)暂堵前后压裂改造体积模拟显示,暂堵前后压裂改造总体积分别约为 0.49×10^6 、 0.58×10^6 m³,暂堵后压裂改造体积相比暂堵前提高18.2%。

(5)针对本井暂堵均衡压裂的成功应用,建议可进一步探索密切割-暂堵均衡压裂技术在区块深煤层水平井中的适用性。

参考文献(References):

[1] 高向东,孙昊,王延斌,等. 临兴地区深部煤储层地应力场及其

- 对压裂缝形态的控制[J].煤炭科学技术,2022,50(8):140-150.
- GAO Xiangdong, SUN Hao, WANG Yanbin, et al. In-situ stress field of deep coal reservoirs in Linxing area and its control on hydraulic fracture morphology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 140-150.
- [2] Zou J P, Jiao Y Y, Tang Z C, et al. Effect of mechanical heterogeneity on hydraulic fracture propagation in unconventional gas reservoirs[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 125: 103652.
- [3] 王遵亲,程万,艾昆,等.井工厂井网部署与压裂模式发展现状与展望[J].钻探工程,2024,51(3):9-19.
- WANG Zuncha, CHENG Wan, AI Kun, et al. Development status and prospect of well pattern deployment and fracturing mode in well factory[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 9-19.
- [4] 张建忠,杨海,刘安邦,等.Slickwo在线清洁压裂液在延长气田Y区域的应用[J].钻探工程,2023,50(2):85-90.
- ZHANG Jianzhong, YANG Hai, LIU Anbang, et al. Application of slickwo online cleaning fracturing fluid in area Y of Yan-chang gas field[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 85-90.
- [5] 李龙,陈显举,彭安钰,等.贵州正安地区常压页岩气压裂关键技术[J].钻探工程,2022,49(5):189-193.
- LI Long, CHEN Xianju, PENG Anyu, et al. Key technologies for hydraulic fracturing of normal pressure shale gas in the Zheng'an area of Guizhou[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 189-193.
- [6] 刘晓旭,吴建发,刘义成,等.页岩气“体积压裂”技术与应用[J].天然气勘探与开发,2013,36(4):64-70.
- LIU Xiaoxu, WU Jianfa, LIU Yicheng, et al. Shale gas “volume fracturing” technology and applications[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2013, 36(4): 64-70.
- [7] Cheng W, Wang R J, Jiang G S, et al. Modelling hydraulic fracturing in a complex-fracture-network reservoir with the DDM and graph theory[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 47: 73-82.
- [8] Cheng W, Lu C H, Feng G X, et al. Ball sealer tracking and seating of temporary plugging fracturing technology in the perforated casing of a horizontal well[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2021, 39(6): 2045-2061.
- [9] 安琦,杨帆,杨睿月,等.鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气体积压裂实践与认识[J].煤炭学报,2024,49(5):2376-2393.
- AN Qi, YANG Fan, YANG Ruiyue, et al. Practice and understanding of deep coalbed methane massive hydraulic fracturing in Shenfu Block, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2376-2393.
- [10] 何发岐,董昭雄.深部煤层气资源开发潜力:以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J].石油与天然气地质,2022,43(2):277-285.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [11] 李根生,盛茂,田守增,等.页岩气储层水平井与压裂工程基础问题探讨[J].科学通报,2016,61(26):2883-2890.
- LI Gensheng, SHENG Mao, TIAN Shouceng, et al. Key issues and investigation of horizontal well drilling and multistage fracturing in shale gas reservoir[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(26): 2883-2890.
- [12] Zhang R, Hou B, Tan P, et al. Hydraulic fracture propagation behavior and diversion characteristic in shale formation by temporary plugging fracturing [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 190: 107063.
- [13] 王旭林,桂志先,王鹏,等.基于最小体积封闭椭圆算法的多段水力压裂改造体积估算[J].科学技术与工程,2020,20(1):48-53.
- WANG Xulin, GUI Zhixian, WANG Peng, et al. Estimation of the stimulated reservoir volume of multi-stage hydraulic fracturing in minimum volume enclosing ellipsoid algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(1): 48-53.
- [14] 许浩,汤达祯,陶树,等.深、浅部煤层气地质条件差异性及其形成机制[J].煤田地质与勘探,2024,52(2):33-39.
- XU Hao, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Differences in geological conditions of deep and shallow coalbed methane and their formation mechanisms[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 33-39.
- [15] 罗伟疆,宁崇如,黄凯.煤层气压裂液研究现状及其展望[J].中国煤层气,2023,20(3):30-35.
- LUO Weijiang, NING Chongru, HUANG Kai. Current situation and prospect of research on coalbed methane fracturing fluid [J]. China Coalbed Methane, 2023, 20(3): 30-35.

(编辑 王文)