

碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂 高效抽采煤层气技术研究

贾建称^{1,2},陈晨^{1,2},董夔^{1,2},吴艳²,吴敏杰²

(1.煤炭科学研究总院,北京 100013;2.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710054)

摘要:中国碎软低渗煤层发育,气含量高,资源潜力大,瓦斯压力大、煤岩力学强度低、顺煤层钻进成孔困难,“有气难出”一直是困扰这类煤层气高效开发和矿井瓦斯治理的关键科学技术问题。芦岭煤矿 8 煤层为碎软、高瓦斯、突出、低渗、难抽采煤层,顶板可钻性较好。引进水平井分段压裂技术,沿煤层顶板施工水平井,采用“泵送桥塞封隔分段、多段多簇定向射孔、逐段分步定向压裂”等成套开发技术,以及“先低后高、先细后粗”的加砂工艺,适时应用段塞式加砂技术,在煤层中形成了多组具有高渗流能力的北东向垂直主裂缝带。经过精细排采,创造了煤层气水平井日产气量超万立方米的纪录。碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂技术的成功应用,突破了“构造煤是煤层气开发禁区”的观念,填补了难抽采突出煤层区地面煤层气高效开发和矿井瓦斯治理技术的空白。

关键词:分段压裂;定向射孔;水平井;碎软低渗煤层;芦岭煤矿

中图分类号:132.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2017)12-1873-09

引用格式:Jia Jiancheng,Chen Chen,Dong Kui,*et al*.Research on the technology of high efficient to drainage CBM by multistage fracturing in horizontal well along the roof of broken soft and low permeability coal seam[J].Natural Gas Geoscience,2017,28(12):1873-1881.[贾建称,陈晨,董夔,等.碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂高效抽采煤层气技术研究[J].天然气地球科学,2017,28(12):1873-1881.]

0 引言

我国将煤层气(瓦斯)作为独立能源进行研究评价始于 1982 年启动的“中国煤成气的开发研究”项目。此后,经过多轮国家重点科技攻关项目、国家重点基础研究发展计划项目、国家科技重大专项、国家自然科学基金项目等的潜心研究,人们深刻认识到中国煤层气的赋存方式、成藏机制、富集规律、产出机理、开发原理既与常规天然气藏的截然不同,又与国外的有显著差异。结合我国煤层气地质特点,围绕提高开采效率研发出煤层封闭取心、注入—压降试井、储层模拟、区块优选、富集区预测、产能预测、储层改造、裂缝监测、抽采效果评价等关键技术工

艺,初步形成了晋城、两淮、松藻等典型地质条件下煤炭与煤层气协调开发模式,建立了单一煤层三区联动井上下立体抽采煤与煤层气协调开发、单一煤层井下强化抽采煤与煤层气协调开发、煤层群保护层卸压强化井上下立体抽采煤与煤层气协调开发、煤层群井下三区配套三超前增透抽采煤与煤层气协调开发等技术体系^[1-6],为煤层气产量的持续增长提供了技术支持。

煤层气开发层位选择与工程部署,系关产气效果。尤其在碎软煤层区,由于煤岩力学强度低,煤层含气量高、渗透性差、瓦斯压力大,不仅导致顺煤层钻孔钻进与成孔困难、抽采效率低。如何实现碎软低渗煤层区煤层气高效抽采,解决“有气难出”问题,

收稿日期:2017-08-16;修回日期:2017-10-27.

基金项目:国家科技重大专项课题(编号:2016ZX05045-002)资助。

作者简介:贾建称(1965-),男,陕西丹凤人,研究员,博士生导师,博士后,主要从事煤与煤层气地质及勘探开发研究。

E-mail:jianchengjia@163.com.

是煤与煤层气协调开发中亟待攻克的关键技术难题。

芦岭煤矿为突出矿井,曾采取“采前预抽、边采边抽、采后续抽”的方式,采用煤层底板穿层钻孔抽采、顺煤层钻孔抽采、地面垂直钻孔抽采、沿煤层顶板走向钻孔抽采、煤巷密闭抽采、风巷高位钻孔移动泵抽采、远距离下保护层抽采等井下瓦斯抽采技术^[7],瓦斯(煤层气)抽采规模与抽采量增长较快。然而,由于煤层碎软、瓦斯含量高、压力大、渗透率低,抽采半径小,瓦斯抽采率仅约30%,突出危险未能根治。2000年芦岭煤矿开始探索“地面钻井·一井三用·先抽后采(掘)防治瓦斯灾害”新技术,至2005年7月在Ⅱ1048工作面预抽纯瓦斯 $248.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2005—2007年,又在Ⅲ101采区施工了5口地面垂直压裂井组(图1),联合抽采8煤层、9煤层、10煤层之气,最高单井产量 $3200 \text{ m}^3/\text{d}$,平均单井产量 $1780 \text{ m}^3/\text{d}$ 。这是当时我国构造煤发育区地面煤层气井组抽采的最好记录,从工程实践上回答了研究区内煤层气抽采的可观前景。然而,地面直井预抽煤层气存在着井组集中度低、单井干扰半径小、抽采速度慢、产量衰变快、井组占地多、管理难度大的缺陷,煤矿再尝试将页岩气水平井分段压裂技术引进8煤层之煤层气抽采中,以期能够快速降低煤层瓦斯含量和压力,提高单井产气量和采收率。

1 煤层气地质背景

芦岭矿井煤层气抽采目标是8煤层、9煤层、10煤层,煤层气资源潜力为 $7.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[8]。其中,8煤层赋存于下石河子组中部,厚度在 $2.72 \sim 17.75 \text{ m}$ 之间,平均为 9.60 m ,全区可采;煤层结构较复杂,伪顶为厚度在 $0 \sim 1.4 \text{ m}$ 之间的炭质泥岩,结构欠完整;直接顶为深灰色块状泥岩和粉砂质泥岩,厚度在 $3.1 \sim 5.2 \text{ m}$ 之间,饱和抗压强度为 $5.50 \sim 6.63 \text{ MPa}$,天然抗拉强度为 $0.56 \sim 0.94 \text{ MPa}$,软化系数为 $0.34 \sim 0.44$,弹性模量为 $1.03 \sim 1.73 \text{ GPa}$,泊松比为 $0.28 \sim 0.31$;老顶为厚度约为 $0 \sim 2 \text{ m}$ 的灰白色细粒砂岩。底板为砂质泥岩或粉砂岩。该煤层遭受强烈的韧性变形改造,以糜棱煤和鳞片煤为主,碎粒煤仅见于煤层之上部和下部[图2(a)];煤体坚固性系数为 $0.11 \sim 0.614$,以小于0.5为主。煤的空气干燥基Langmuir体积为 $16.74 \sim 18.97 \text{ cm}^3/\text{g}$,平均为 $18.78 \text{ cm}^3/\text{g}$;Langmuir压力为 $2.40 \sim 3.41 \text{ MPa}$;气含量($C_{\text{空}}$)为 $2.87 \sim 12.28 \text{ cm}^3/\text{g}$,平均为 $6.57 \text{ cm}^3/\text{g}$;瓦斯压力为 $2.01 \sim 3.27 \text{ MPa}$,平均为 2.65 MPa 。9煤

层位于下石河子组下部,厚度为 $0.0 \sim 7.88 \text{ m}$,平均为 2.93 m ,上距8煤层平均为 3.5 m ,全区可采;煤层结构简单,顶板、底板以泥岩为主,局部为粉砂岩。该煤层之煤体结构为原生结构煤夹 $0.2 \sim 2 \text{ m}$ 的糜棱煤,顶部和底部有少量碎裂煤[图2(b)]。煤体坚固性系数为 $0.17 \sim 0.41$,空气干燥基Langmuir体积在 $18.20 \sim 21.64 \text{ cm}^3/\text{g}$ 之间,平均为 $20.40 \text{ cm}^3/\text{g}$;Langmuir压力为 $2.60 \sim 3.21 \text{ MPa}$,气含量在 $4.35 \sim 10.49 \text{ cm}^3/\text{g}$ 之间,平均为 $7.04 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。10煤层赋存于山西组中部,厚度为 $0 \sim 4.99 \text{ m}$,平均为 1.86 m ,上距9煤层平均为 66 m ,全区可采;煤层结构较简单,顶板以中粒砂岩为主,细砂岩、泥岩次之;底板为泥岩,局部为细砂岩与粉砂岩互层。该煤层为原生结构,煤的空气干燥基Langmuir体积在 $18.09 \sim 19.00 \text{ cm}^3/\text{g}$ 之间,平均为 $18.79 \text{ cm}^3/\text{g}$;Langmuir压力为 $2.70 \sim 3.78 \text{ MPa}$,气含量在 $2.86 \sim 13.63 \text{ cm}^3/\text{g}$ 之间,平均为 $8.60 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。

芦岭矿井位于宿东复式向斜南翼,构造线呈北西—南东向,煤层倾角为 $5^\circ \sim 20^\circ$,开阔褶皱和中小型断层发育^[9-11],由深部到浅部煤体韧性变形越来越强烈,为印支末期纵弯褶皱作用使煤系“核扩翼缩式”层滑运动和燕山期脆性变形叠加的产物。

矿井含水层之间为稳定的相对隔水层,地下水循环能力弱,水文地质条件对煤层气开发影响不大^[10]。

矿井Ⅱ水平的现代地应力最大主应力值(σ_h)为 $20.0 \sim 34.1 \text{ MPa}$,以近东西向为主;最小主应力(σ_h)为 $7.0 \sim 12.0 \text{ MPa}$,以近南北向为主,且大于自重应力(σ_v),属于高应力值区水平构造应力场^[12,13]。

8+9煤层合层试井渗透率为 $(0.464 \sim 0.99) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,10煤层渗透率为 $(0.04 \sim 0.10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;储层压力为 $5.40 \sim 8.12 \text{ MPa}$,处于低压异常状态;临/储压力比为 $0.20 \sim 0.29$,含气饱和度为 $43\% \sim 53\%$ 。临/储压力比和含气饱和度低,意味着研究区内煤层气降压排采难度大。

2 工程设计与部署

2.1 抽采区块与井型选择

煤层气为贫矿,商业开发具有投资大、见效慢、风险高的特点。为了确保水平井组实施,同时达到煤炭与煤层气协调开发之目的,抽采区块选择主要考虑:①煤层厚度较大且分布稳定;②煤层气含量高;③区块面积大且构造简单;④煤层埋深适中;⑤邻近前期煤层气开发成功区域;⑥地形平坦、交

通方便。

沿碎软低渗煤层水平钻进由于存在“钻穴”问题^[14],往往排渣难、卡钻严重,进尺小、钻进效率低,孔壁破坏严重,成孔难,事故率高、抽采效果差,因此多分支或羽状水平井技术难以奏效。将井位部署在这类煤层之顶板、底板,既便于施工,同时钻井可替代高抽巷或低抽巷。

2.2 井向与井眼轨迹选择

2.2.1 井向选择

现代地应力是影响煤储层水压裂缝形态与扩展方向的关键因素。相似材料模拟实验和微震实时监

测结果表明,水力压裂缝在煤层中以井眼为中心扩展,形态为椭圆形,长轴平行于最大水平主应力的方向延伸,沿垂直于最小水平主应力的方向扩展^[15-17]。

芦岭煤矿现代地应力状态是 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$,压裂在井筒周围产生的主要是长轴垂直的椭球状裂缝^[15,18,19]。WLG01 井附近的现代地应力状态是 $\sigma_H = 33.67 \text{ MPa}$,近水平; $\sigma_v = 15.6 \text{ MPa}$,近直立; $\sigma_h = 16.7 \text{ MPa}$ 。微震监测表明,WLG03 井压裂缝走向为 41.3° 。在保障井筒稳定的前提下,为了使更多的压裂缝沟通井筒,LG01-H 水平井眼轨迹与煤层走向一致,即 138.7° (图 1)。

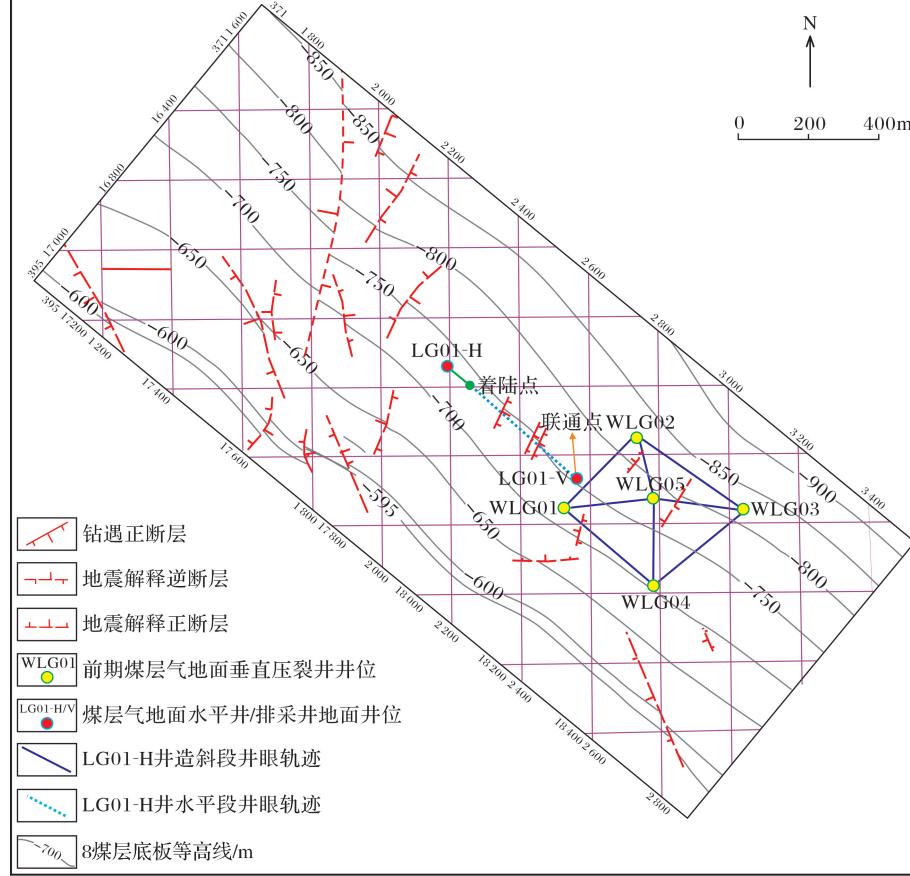


图 1 地面钻井井位

Fig.1 Ground driving well position

2.2.2 井眼轨迹

Ⅲ101 采区 5 口地面垂直井组附近 8 煤层和顶板泥岩厚度较大、分布稳定,泥岩结构完整、延伸性好,岩石致密均一,弹性模量小,泊松比较高。WLG01 垂直井西北部 770m 以西为隐蔽断层带,因此将地面水平井布置在该井北西方向 600m 处,井号 LG01-H;排采直井号 LG01-V。水平井垂直段着陆点到排采直井联通点的水平段长度为 585.96m

(图 1,图 3)。FRACpro PT 三维压裂软件(2012 款)模拟结果表明,水平段布置在 8 煤层顶板泥岩中 0~2m,是可以压开煤层并形成有效裂缝的^[20]。

2.3 水平井分段

2002 年以来国外许多油气公司开始尝试将水平井分段压裂技术应用到非常规油气资源开发中。为了增加钻遇高产时段的几率和渗流面积,压裂段数越分越多,相应地形成了水力喷射分段压裂、裸眼

封隔器分段压裂、快钻式桥塞隔离分段压裂等技术。

芦岭矿井 8 煤层之割理—裂隙系统已严重破坏,压裂缝是煤层气渗流的主要通道,因此压裂改造技术是煤层气井增产的主要手段。根据人工裂缝诱

导应力场数学模型,结合水平井压裂规模和产能预测结果,采用“先等分、再微调”的方法对不同段数、间距进行模拟,比优模拟数据,将水平段分为 7 个压裂段,每段长度为 80~90m(图 3),段与段之间用

分层	层底标高 /m	厚度 /m	宏观煤岩类型	煤体结构
1	-439.35	0.35		碎裂结构
2	-440.97	1.62		
3	-442.19	1.22		糜棱结构
4	-442.86	0.67		
5	-443.44	0.58		鳞片结构
6	-444.05	0.61		
7	-444.36	0.31		糜棱结构
8	-445.09	0.73		
9	-445.33	0.24		
10	-446.12	0.79		鳞片结构
11	-446.93	0.81		
12	-447.82	0.89		糜棱结构
13	-448.09	0.27		
14	-448.50	0.41		碎裂结构
15				

(a)8煤层

分层	层底标高 /m	厚度 /m	宏观煤岩类型	煤体结构
1	-572.05	0.11		碎裂结构
2	-574.22	2.17		原生结构
3	-574.63	0.41		糜棱结构
4	-575.44	0.81		原生结构
5	-575.70	0.26		碎裂结构
6				

(b)9煤层

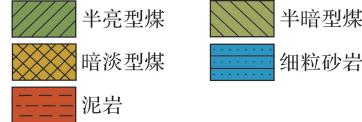


图 2 芦岭煤矿煤层之煤体结构

Fig.2 Coal body structure of coal seams in Luling coal mine

5-1/2复合材料机械桥塞隔离。

2.4 定向射孔

定向射孔的目的是沟通裂缝和井筒,减少井筒附近裂缝的弯曲程度。射孔技术的核心是追求尽可能大地穿深,而大穿深一般是通过射孔弹和射孔器性能的最佳组合来实现的。近年来,为了提高射孔器的更大穿深,出现小枪装大弹——小直径射孔枪装配大药量射孔弹的趋势。根据本井生产套管直径,选择 102 型射孔弹分别在 89 型、95 型射孔枪进行地面穿透水泥靶对比试验,结果表明 95 型射孔枪

的平均穿深为 645mm,比 89 型射孔枪的穿深提高 27.6%,并且能够实现在水平井射孔段内任意方向进行定向射孔。优化后射孔簇的密度为 10~13 孔/m,经检查射孔器材上射孔弹的发射率超过 95%。

2.5 定向压裂

2.5.1 压裂液优选

水平井分段定向压裂的目的在于通过最大限度地改造碎软低渗煤储层的物理力学结构,形成更多具备高渗透能力的人工裂缝网络,增加体积膨胀率,降低井筒附近煤层气的流动阻力,提高单井产量和

最终采收率。压裂过程中,压裂液起着造缝和携砂作用,不同压裂液有特定的性能与适应条件^[21~23],选择与煤层物性特征相配伍的压裂液和添加剂是降低储层伤害、提高携砂能力、有效改造储层的关键。考虑到芦岭煤矿 8 煤层比表面积大、吸附滞留作用强、

返排困难,通过对国内外常用的活性水压裂液、胍胶压裂液、清洁压裂液、氮气泡沫压裂液的模拟对比性试验研究发现,配液工艺简单的低黏度活性水压裂液(配方为清水+1% KCl+0.2% YZ-1+0.05%杀菌剂)对储层伤害程度较小、成本较低、反排较容易,

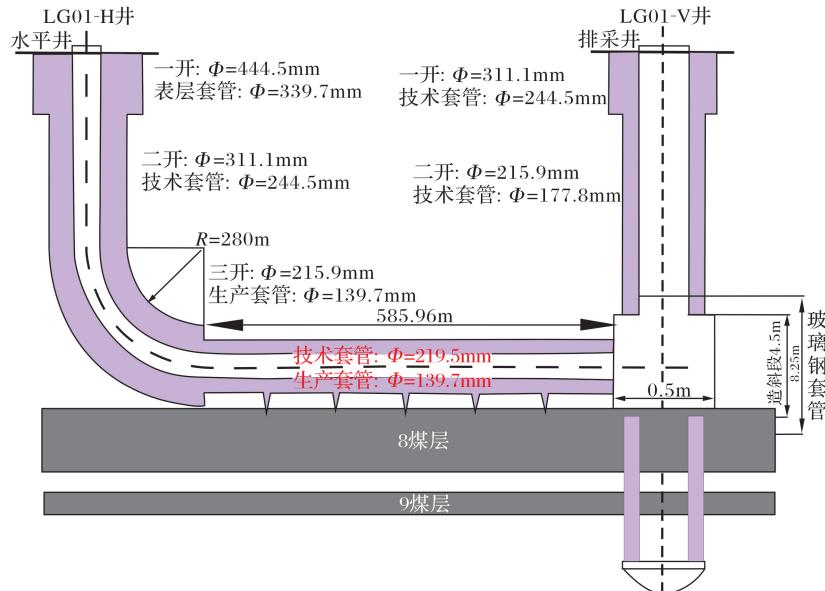


图 3 LG01 钻井之井身结构示意

Fig.3 The schematic map of Well LG01 structure

防煤层膨胀和助排效果较好^[24]。

2.5.2 支撑剂选择

支撑剂是保持煤层在压裂后仍存在一定导流能力裂缝通道的基础材料,常用的有天然石英砂、陶粒、玻璃球、铝球、树脂包层砂等,粒度有 12~20 目、20~40 目、100 目。碎软煤层对支撑剂强度要求不高,支撑剂选择主要考虑其物理性能和成本:①抗压强度大于被支撑对象的闭合压力,以防止压后闭合;②视密度尽可能小,便于施工泵送;③圆度、球度尽可能高,有利于较远距离输送;④在地层和施工条件下化学性质稳定;⑤价格低廉,便于购买。

支撑剂粒度是影响压裂缝导流能力的重要因素之一。粒度大则强度降低,裂缝壁面效应影响大,沉降速度快,携带困难;粒度小则形成的流动孔隙小,容易引起局部堵塞,降低有效渗透率。

与新疆石英砂、宜兴陶粒等相比,兰州石英砂的 SiO_2 含量为 98%,孔隙率为 43%,始裂压力为 20MPa,视密度为 2.66g/cm^3 ,体积密度为 1.75g/cm^3 ,蚀度为 198.7mg/L ,盐酸溶解度 $\leqslant 0.2\%$,价格为 320 元/t,是研究区碎软低闭合压力储层改造的经济实用材料。根据煤层特征和压裂缝几何尺度模拟,优选 2 种粒

度的支撑剂组合:注泵初期使用 20~40 目中砂,既能降低滤失又确保裂缝末端被支撑;注泵末期使用 16~20 目粗砂,有利于裂缝保持长期的导流能力。

2.5.3 压裂规模及强度设计

碎软低渗煤层水力压裂缝的形成和扩展要比全硬煤层的困难。参考 WLG02 井 8 煤层基本参数,使用 FRACpro PT 压裂软件分别模拟了加砂规模为 30m^3 、 40m^3 和 50m^3 ,注入排量为 $6\sim 10\text{m}^3/\text{min}$ 条件下的裂缝延伸模型,认为压裂规模为 50m^3 时,注入排量为 $8\sim 10\text{m}^3/\text{min}$ 的水力裂缝长度为 $110.4\sim 121.6\text{m}$,缝高为 $36.2\sim 38.4\text{m}$;支撑裂缝长度为 $90.6\sim 98.6\text{m}$,缝高为 $30.7\sim 31.4\text{m}$ 。8 煤层和 9 煤层可被同时压开并能够形成几何形态良好的有效支撑裂缝。

3 分段定向射孔与压裂技术

3.1 钻井与固井技术

钻井使用风压空气钻进,水平井采用“三开”钻进,排采井采用“二开”钻进,下套管固井技术(图 3)。钻井过程中井眼轨迹由随钻测井、测斜仪精准控制^[25]。

3.2 定向射孔技术

利用电缆泵送桥塞将射孔枪传到设计射孔位置,点火坐封桥塞,然后上提射孔枪至预定井深射孔。使用95型射孔枪配102型射孔弹分别在垂直和与垂直方向夹角45°的方向上向下射孔,形成扇形孔组,达到水平井眼与煤层的充分沟通。

3.3 定向压裂工艺与技术

3.3.1 压裂工艺

采用电缆泵送桥塞+射孔联作的方式对LG01-H井进行逐段压裂。经过井筒排空和井口试压,前置液阶段首先以小排量向煤层注入活性水压裂液,以了解管柱畅通性与煤层吸收能力;然后快速增加排量,煤层中将产生足够压力而形成裂缝。携砂液阶段,由压裂液间断携带兰州石英砂进入煤层压裂缝中,混砂比由低到高。顶替液阶段,将井筒内携砂液全部而不过量地注入煤层压裂缝中。单段压裂时间在135~150min之间,加砂强度由6m³/min逐渐

增加到9m³/min,平均混砂比为13%。7段压裂共注入压裂液为6 627m³,泵送桥塞用液为194.5m³,累计达6 821.5m³;加砂为542.5m³,其中20~40目中粒石英砂为464.1m³,16~20目粗粒石英砂为78.4m³。施工最高泵压27MPa,最大注入排量为10m³/min。

3.3.2 段塞式加砂技术

水平井压裂的起裂机理和垂直井、普通定向井的不同,尤其是沿煤层顶板分段多簇定向射孔、逐段分步压裂,很容易在近筒附近形成多裂缝和高弯曲度裂缝,产生高裂缝弯曲摩阻,引起脱砂和砂堵^[26-28]。为了减小裂缝弯曲摩阻,在前置液阶段泵注少量低浓度混砂液,可在水力切割作用下冲刷、打磨、切割裂缝,使裂缝壁面平滑,有效降低微裂缝进液阻力,使主压裂缝沿一定方向有较大宽度延伸。携砂液阶段,当泵注压力突然上升时中断加砂,采取中顶液措施(图4之A、B、C、D段,图5之E、F、G、

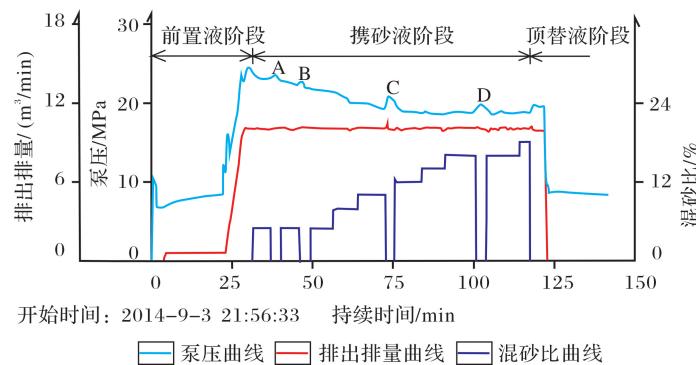


图4 LG01-H井第二段压裂综合曲线

Fig.4 The fracturing composite curve of Well LG01-H in the second section

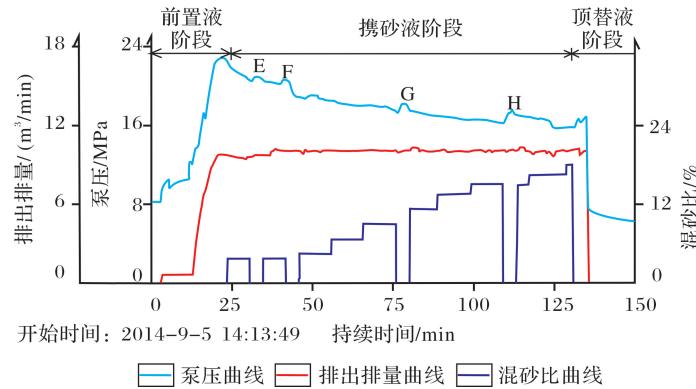


图5 LG01-H井第六段压裂综合曲线

Fig.5 The fracturing composite curve of Well LG01-H in the sixth section

H段),待压力恢复正常后再加砂。这样,既有利于清理水平段的沉砂,又降低了泵送桥塞的困难,提高了分段压裂的成功率。

3.3.3 压裂效果分析

压裂综合曲线是判断地(煤)层是否被压开的重要图件。前置液阶段,地(煤)层被压开则表现为:

① 泵压迅速下降、排量上升;② 泵压不变、排量上升;③ 排量不变,泵压上升到一定值后迅速下降。芦岭煤矿 LG01H 井第二段在开压 29min 时,当排量保持 $17\text{m}^3/\text{min}$,泵压达到 24MPa 后则迅速下降(图 4);第六段在开压 23min 时,当排量保持 $10\text{m}^3/\text{min}$ 时,泵压到 23MPa 后迅速下降(图 5),均说明煤层被压开。携砂液阶段,在排量相对稳定时,随着裂缝扩展和延伸,混砂比逐渐增加,泵压在缓慢下降中渐趋稳定,压裂综合曲线为下降稳定型,说明裂缝已穿过低应力层垂向延伸。

嵌入式微地震裂缝监测结果也表明,芦岭煤矿 8 煤层顶板水平井分段分步压裂在煤层中产生了多条与井眼轨迹方向垂直的北东向垂直主裂缝带^[20],缝长和缝高与模拟的结果相近。

4 排采效果

LG01-H 井压裂结束后,采用抽油机+管式泵排水和油套环空产气技术,经过放喷治涌,于 2015 年 1 月 19 日开始排采,同年 4 月 16 日 LG01-V 井有气显示,之后产气量稳定增长。2016 年 1 月 3 日,该井产气量达 $10\ 172.5\text{m}^3$,1 月 12 日达 $10\ 754.8\text{m}^3$ (图 6)。累计产气量为 $91.24 \times 10^4\text{m}^3$,平均日产气量为 $9\ 505\text{m}^3$ 。这标志着我国在碎软低渗突出煤层区地面煤层气高效开发关键技术研究上取得了重大进展。

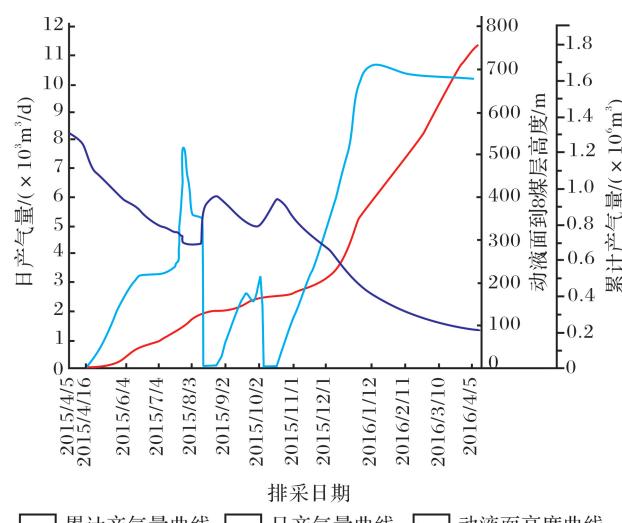


图 6 芦岭煤矿 LG01 水平井组排采曲线

Fig.6 The curve of LG01 horizontal well drainage in Luling coal mine

5 结论

(1) 芦岭煤矿 8 煤层属于典型的碎软、高瓦斯、

突出、低渗、难抽采煤层,顶板可钻性较好。采用精确地质导向钻井、泵送桥塞封隔、多段多簇定向射孔、逐段分步定向压裂等成套开发技术,通过精细开采在碎软低渗煤层区创造了水平井分段压裂井日产气量突破万方的世界纪录,有效解决了“有气难出”问题,突破了“构造煤是煤层气开发禁区”的观念,对类似地质条件的高突矿区地面煤层气高效开发和矿井瓦斯治理具有技术示范作用。

(2)如果说水平井分段压裂已成为非常规气井增产的主要措施,水平井和定向射孔与分段压裂则是碎软低渗煤层区煤层气安全高效抽采的关键技术。利用地质参数进行数值模拟,合理分段、优化加砂规模和注入排量,是形成几何形态优良的压裂缝的核心工艺。

(3)活性水和兰州石英砂是研究区内大规模压裂的实用压裂液配伍,“先低后高、先细后粗”的加砂方式是降低碎软低渗煤层中压裂液滤失、形成有效支撑、保持长期导流能力裂缝的主要工艺。嵌入式微地震裂缝监测结果表明,采用这种工艺在芦岭煤矿 8 煤层中形成的主裂缝带方向、长度和高度与压裂软件模拟的结果相近,充分说明其有效性。

(4)多裂缝和高度弯曲裂缝是从围岩向煤层射孔和分段压裂过程中不可回避的破裂痕迹,段塞式加砂技术是规避脱砂和砂堵风险的有效措施。

参考文献(References)

- [1] Lei Yi, Shen Baohong, Liu Jianzhong. Initial discussion of coalbed methane and coal coordination mining mode[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(3): 1-4. [雷毅, 申宝宏, 刘见中. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发模式初探[J]. 煤矿开采, 2012, 17(3): 1-4.]
- [2] Li Guofu, Li Bo, Jiao Haibin, et al. Three-region integrated CBM stereo-extraction in Jincheng Mining area[J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(1): 3-7. [李国富, 李波, 焦海滨, 等. 晋城矿区煤层气三区联动立体抽采模式[J]. 中国煤层气, 2014, 11(1): 3-7.]
- [3] Jin Xianglan. A discussion on coal and CBM coordinated exploitation mode in coalmine areas: A case study in Jincheng Mining area[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(9): 16-19. [晋香兰. 煤矿区煤与煤层气协调开发模式的探讨:以晋城矿区为例[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(9): 16-19.]
- [4] Wu Xiuping, Zhang Qun. Study on influence of development mode and stimulation technique on the recovery of coalbed methane[J]. China Coalbed Methane, 2014, 1(2): 20-24. [巫修平, 张群. 开发模式和增产技术对煤层气采收率影响研究[J]. 中国煤层气, 2014, 1(2): 20-24.]

- [5] He Tiancai, Wang Baoyu, Tian Yongdong. Development and issues with coal and coal-bed methane simultaneous exploitation in Jincheng mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1779-1785. [贺天才, 王保玉, 田永东. 晋城矿区煤与煤层气共采研究进展及急需研究的基本问题[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1779-1785.]
- [6] Shen Baohong, Liu Jianzhong, Lei Yi. Present status and prospects of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 1-4. [申宝宏, 刘见中, 雷毅. 我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 1-4.]
- [7] Wang Xinkun, Li Zhong, Rui Shaofa. Technology and experience of gas drainage in Luling coal mine[J]. Coal Mine Safety, 2002, 33(12): 14-15, 26. [王新琨, 李忠, 芮绍发. 芦岭煤矿瓦斯抽放技术与经验[J]. 煤矿安全, 2002, 33(12): 14-15, 26.]
- [8] Jia Jiancheng. Report of Coalbed Methane Resource Evaluation in Huabei Coalfield[R]. Xi'an: China Coal Technology and Engineering Group Xi'an Research Institute, 1996. [贾建称. 淮北煤田煤层气资源评价报告[R]. 西安: 中煤科工集团西安研究院有限公司, 1996.]
- [9] Qu Zhenghui, Jiang Bo, Wang Jilin, et al. Characteristics of tectonic evolution and its controlling effects on coal and gas in Huabei area[J]. Coal Geology of China, 2008, 20(10): 34-37. [屈争辉, 姜波, 汪吉林, 等. 淮北地区构造演化及其对煤与瓦斯的控制作用[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(10): 34-37.]
- [10] Lei Nengzhong. Predication and Stochastic Modeling of Coalbed Methane Reservoir Properties in Luling Well Field[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012. [雷能忠. 芦岭井田煤储层属性预测与随机建模[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.]
- [11] Liu Yuhui, Li Jianwu, Zhang Peihe, et al. The selection of suitable development method and geological conditions of CBM development in Luling coal district[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(2): 25-28. [刘钰辉, 李建武, 张培河, 等. 芦岭井田煤层气开发地质条件及开发方式选择[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(2): 25-28.]
- [12] Tian Yonghua. Study on Ground Stress of Second Level and Its influence to the Roadway Deformation of Luling Coal Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2010; 37-51. [田花永. 芦岭煤矿Ⅱ水平地应力场特征及其对巷道变形影响研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010; 37-51.]
- [13] Xu Juan. Comprehensive Evaluation of Roof Stability of 10th Seam in Luling Coal Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014; 51-59. [徐娟. 芦岭煤矿10#煤层顶板稳定性综合评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014; 51-59.]
- [14] Sun Yuning, Wang Yonglong, Zhai Xinxian, et al. Analysis on reasons of drilling difficulty in soft and outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 117-121. [孙玉宁, 王永龙, 翟新献, 等. 松软突出煤层钻进困难的原因分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 117-121.]
- [15] Kang Xiangtao. Research on Hydraulic Fracturing Propagation Rules in Coal Seam and Gas Extraction Drilling Optimization [D]. Chongqing: Chong Qing University, 2014. [康向涛. 煤层水力压裂裂缝扩展规律及瓦斯抽采钻孔优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.]
- [16] Li Lindi, Zhang Shicheng, Geng Meng. A study of the propagation law of hydraulic fractures in coalbed gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2): 72-74. [李林地, 张士诚, 庚勐. 煤层气藏水力裂缝扩展规律[J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 72-74.]
- [17] Zhang Xuewen, Fang Hongchang, Xi Yinan, et al. A study on factors affecting the performance of hydraulically fractured horizontal well in low permeability reservoirs[J]. Acta Petroleii Sinica, 1999, 20(4): 51-55. [张学文, 方宏长, 裴铎楠, 等. 低渗透率油藏压裂水平井产能影响因素[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 51-55.]
- [18] Wang Zhongmao, Hu Jiangming. Study on the formation of fracture in hydraulic fracturing[J]. Acta Petroleii Sinica, 1994, 21(6): 66-69. [王仲茂, 胡江明. 水力压裂形成裂缝形态的研究[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(6): 66-69.]
- [19] Li Anqi, Jiang Hai, Chen Caihong. Practice of hydraulic fracturing in coalbed methane wells in China and analysis of coal seam fracture model selection[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 91-94. [李安启, 姜海, 陈彩虹. 我国煤层气井水力压裂的实践及煤层裂缝模型选择分析[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 91-94.]
- [20] Yao Tuanqi, Wang Jing, Xu Yaobo, et al. Practice of staged fracturing enhanced extraction method for horizontal wells in broken soft coal seam[J]. Liaoning Chemical Industry, 2015, 44(12): 1466-1470. [姚团琪, 王晶, 许耀波, 等. 针对碎软煤层水平井分段压裂强化抽采方法实践[J]. 辽宁化工, 2015, 44(12): 1466-1470.]
- [21] Wang Yongli, Zhong Lianzhu, Li Anqi, et al. Study on fracturing fluid technology for coalbed methane well[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(6): 27-30. [汪永利, 丛连铸, 李安启, 等. 煤层气井用压裂液技术研究[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 27-30.]
- [22] Song Yongfang, Liao Bichao, Liang Shunwu, et al. Application of bridge plug perforation staged fracturing technology in U coalbed methane Well LG01-H well[J]. West China Exploration Engineering, 2015, 27(12): 41-43. [宋永芳, 廖碧朝, 梁顺武, 等. 桥塞射孔分段压裂工艺在U型煤层气井——LG01-H井中的应用[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(12): 41-43.]
- [23] Li Ting. Research and development of coalbed methane fracturing fluid[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2013, 36(1): 51-53. [李亭. 煤层气压裂液研究及进展[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(1): 51-53.]
- [24] Xu Yaobo. Optimization of fracturing fluid based on characteristics of coal reservoir in Luling mine field[J]. Coal Mine Safety, 2015, 46(7): 67-69. [许耀波. 基于芦岭井田煤储层特征的压裂液优选[J]. 煤矿安全, 2015, 46(7): 67-69.]
- [25] Xu Jianjun. Application of Geological Steering Technology in

- Luling Mine Field[D].Xi'an:Xi'an Research Institute of Coal Science Research Institute,2015.[徐建军,地质导向技术在芦岭井田的应用研究[D].西安:煤炭科学研究院西安研究院,2015.]
- [26] Van de Ketterij R G,Pater de C J.Experimental study on the impact of perforations on hydraulic fracture tortuosity[J].SPE Production & Facilities,1997,SPE 38149.
- [27] Hossain M M,Rahman M K,Rahman S S.A comprehensive monograph for hydraulic fracture initiation from deviated wellbores under arbitrary stress regimes[J].SPE Production & Facilities,1999,SPE 54360.
- [28] George Waters.Technology Enhancements in the Hydraulic Fracturing of Horizontal Wells[R].La France:Schlumberger,2011.

Research on the technology of high efficient to drainage CBM by multistage fracturing in horizontal well along the roof of broken soft and low permeability coal seam

Jia Jian-cheng^{1,2},Chen Chen^{1,2},Dong Kui^{1,2},Wu Yan²,Wu Min-jie²

(1.China Coal Research Institute,Beijing 100013,China;

2.Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp.Ltd.,Xi'an 710054,China)

Abstract: Broken soft and low permeability coal seam, with high gas content, high gas pressure, grant resource potential, and low mechanical strength, developed well in China. Formation of hole along the coal seam drilling is difficult, and the key science and technology problem in CBM efficient development and the mine gas control of this coal seam area have always been difficult to extract gas. No.8 coal seam of Luling coal mine is in broken soft, high gas, outburst, low permeability, difficult extraction, easy drill ability of roof. Introducing horizontal well and multistage fracturing techniques, constructing horizontal well along the coal seam roof, using a complete set of developing techniques: pumping bridge plug multistage, multi-stage clustering directional perforation, piecewise directional fracturing step by step, and adopting the sand technologies of first low to high, first coarse to fine, applying slug-style sand technology duly, multiple sets of north-east main vertical fracture belts with high seepage ability were formed in the coal seam. Through fine drainage management technology, the horizontal well creates a record that daily CBM production is more than ten thousand cubic meters. The successful application of multistage fracturing in horizontal well along the roof of broken soft and low permeability coal seam, breaking through the concept that “structure coal is forbidden zone to develop CBM”, filling the techniques gap in surface CBM efficient development and coal mine gas control of difficult extracting coal seams area.

Key words: Multistage fracturing; Oriented perforating; Horizontal well; Broken soft and low permeability coal seam; Luling coal mine