煤矿井下控制水力压裂煤层增透关键技术及应用

郭臣业[1,2,3],沈大富[2],张翠兰[2],王书琪[4],郭 晨[3]
(1.中国矿业大学(北京),北京 100083;2.重庆市能源投资集团科技有限责任公司,重庆 400060;
3.重庆科技学院,重庆 401331;4.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030)

摘 要: 为了减少低透气性煤层瓦斯抽采钻孔工程量和提高瓦斯抽采效率,对低透气性煤层增透理论及技术应用进行了研究,基于煤层控制水力压裂概念,开发了煤矿井下水力压裂数值模拟与优化设计软件,提出了高承压上向孔和近水平孔的封堵方法,形成了压裂水分布范围探测关键技术,并进行现场应用。结果表明,通过定点定向定区域压裂实现了目标区域煤层的增透,控制水力压裂前后相比单孔瓦斯抽采量提高了 5 倍以上,部分工作面瓦斯抽采钻孔工程量减少了 1/3,采掘工作面单产单进大幅提高,煤矿井下控制水力压裂是对常规水力压裂技术的改进和创新,能有效促进目标区域煤层增透、提高瓦斯治理效果。

关键词: 煤层增透;控制水力压裂;封堵技术;压裂监测
中图分类号: TD712.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)02-0114-05

Key technology and application of controlled hydraulic fracturing and seams permeability improvement in underground coal mine

GUO Chen-ye[1,2,3],SHEN Da-fu[2],ZHANG Cui-lan[2],WANG Shu-qi[4],GUO Chen[3]
(1.*China University of Mining and Technology (Beijing)*,*Beijing* 100083,*China*;2.*Chongqing Energy Technology Investment Group Company Limited*,*Chongqing* 400060,*China*;3.*Chongqing University of Science and Technology*,*Chongqing* 401331,*China*;4.*National Key Lab of Coal Mine Disaster Dynamics and Control*,*Chongqing University*,*Chongqing* 400030,*China*)

Abstract: In order to reduce an engineering quantity of the gas drainage borehole in low permeability seam and to improve the gas drainage efficiency,a study was conducted on the permeability improvement theory and technology application in a low permeability seam.Based on the controlled hydraulic fracturing conception of the seam,a hydraulic fracturing numerical simulation in the underground mine and the optimized design software were developed and a sealing method of a high pressurized upward borehole and horizontal borehole was provided. Thus the key technology to detect the fracturing water distribution scope was developed and the site application was conducted.The results showed that with a target,orientation and regional fracturing to realize a permeability improvement of the target regional seam,in comparison with the before and after the controlled hydraulic fracturing,the single borehole gas drainage volume was improved over five times,the gas drainage borehole engineering workload was reduced by 1/3 in some coal mining face,a single day coal production and driving rate of the gateway driving face was highly improved.The controlled hydraulic fracturing in the underground mine was an improvement and innovation of the conventional hydraulic fracturing technology and could effectively promote the seam permeability improvement in the target region and could improve the gas control effect.

Key words: seam permeability improvement; controlled hydraulic fracturing; sealing technology; fracturing monitoring and measurement

0 引 言

煤矿井下控制水力压裂是对常规水力压裂技术的改进和创新,能有效促进目标区域煤层增透、提高瓦斯治理效果。重庆地区煤层透气性系数一般小于 0.1 $m^2/(MPa^2 \cdot d)$,属较难抽采煤层。为减少瓦斯

收稿日期:2014-11-08;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2015.02.026
基金项目:国家科技重大专项资助项目(2008ZX05015);重庆市科技攻关资助项目(cstc2012gg-yyjs90001)
作者简介:郭臣业(1980—),男,安徽宿州人,高级工程师,博士。Tel:023-62627629,E-mail:gcyer@aliyun.com
引用格式:郭臣业,沈大富,张翠兰,等.煤矿井下控制水力压裂煤层增透关键技术及应用[J].煤炭科学技术,2015,43(2):114-118,122.
GUO Chen-ye,SHEN Da-fu,ZHANG Cui-lan,*et al*.Key technology and application of controlled hydraulic fracturing and seams permeability improvement in underground coal mine[J].Coal Science and Technology,2015,43(2):114-118,122.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

抽采钻孔工程量和缩短瓦斯抽采时间,需进行煤层增透理论及相关技术研究。目前采取的低透气性煤层区域卸压增透技术包括层间的区域卸压增透技术和层内的区域卸压增透技术。层间的区域卸压增透技术主要是保护层开采技术,该技术已趋于成熟并取得了良好的卸压效果,但在开采单一煤层或保护层时无法使用,对于没有保护层开采的矿井,主要采用层内卸压增透技术,常规层内区域卸压增透技术有水力挤出、水力冲孔、水力冲刷、水力割缝、旋转水射流、水力掏槽、深孔控制预裂爆破等[1-3]。这些方法存在煤层增透影响范围小、工作量大、施工工艺复杂等问题,难以满足煤层区域瓦斯治理的需要。水力压裂技术广泛应用于油气井增产及地面煤层气的开发,近年来应用在煤矿井下区域煤体增透[4-5],以提高瓦斯抽采率,达到煤与瓦斯共采、降低瓦斯突出危险性的目的。煤层水力压裂效果受地层赋存条件、封堵技术、压裂施工工艺、监测技术等诸多因素影响[6-8],为了有效提高煤层井下水力压裂效果,笔者基于煤矿井下控制压水力裂增透理论,研究控制水力压裂中高承压钻孔封堵、压裂水分布范围的监测等关键技术,并在现场进行工业应用。

1　控制水力压裂方法与机理

1.1　控制水力压裂简介

在煤层水力压裂过程中,影响煤层破裂效果的因素有煤的强度、孔隙率、煤和水的湿润角等参数,地应力大小和方向是起裂压力、裂缝起裂位置及形态的重要决定因素,煤体破坏类型是能否适用压裂的主要判定指标。一般认为,Ⅰ、Ⅱ类煤适合压裂,Ⅲ类煤可压裂,Ⅳ、Ⅴ类煤不适合压裂。

对煤层进行水力压裂增透既要保证在目标区域充分产生裂缝,实现定点定向定区域压裂,又要确保非目标区域煤岩层不被破坏,特别是不能破坏封孔段煤岩层。因此,在煤矿井下进行水力压裂时要有可控性,实现控制水力压裂。井下控制水力压裂是通过压入水量、压力和影响范围监测来控制压裂过程,实现目标区域煤层的增透。煤层控制水力压裂可分为吞吐压裂技术、水力喷射压裂技术、水力压冲技术、分段分层压裂技术、顶底板压裂技术等。

1.2　控制水力压裂机理分析

控制单孔压裂的压力和压入水量,是控制煤层压裂过程的主要手段。

1) 压入水量 V 的确定。压入水量根据预定影响范围及煤岩层影响体孔隙率计算,计算公式为:

$$V = kV_n \tag{1}$$

式中: k 为煤体孔隙率,%; V_n 为压裂水影响体积,m^3。

在注水形成压力之前,需充满压裂泵组至压裂孔的管道,此处需要的水量约为:

$$V_c = V_g + V_k;\ V_g = \pi r_g^2 h_g;\ V_k = \pi r_k^2 h_k \tag{2}$$

式中: V_c 为充填管道和压裂孔所需水量,m^3; V_g、r_g、h_g 分别为充填管道所需水量、管道半径和管道长度,m^3、m、m; V_k、r_k、h_k 分别为充填压裂孔所需水量、压裂孔半径和压裂孔长度,m^3、m、m。

2) 压力计算。破裂压力 p_f,破裂压力计算式为

$$p_f = p_1 + p_2 + p_3 \tag{3}$$

$$p_1 = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i h_i \tag{4}$$

式中: p_1 为上覆岩层压力,MPa; p_2 为岩石抗拉强度,MPa,取 2~10 MPa; p_3 为管道摩擦阻力,MPa; γ_i 为上覆岩石容重; h_i 为第 i 层岩石厚度; n 为上覆岩层总层数。

沿程压力损失。输水管道沿程压力损失 ΔP_1 计算公式为

$$\Delta P_1 = \lambda l \rho v^2 / (2d) \tag{5}$$

式中: λ 为沿程阻力系数; l 为管道长度,m; ρ 为液体密度,kg/m^3; v 为液体流速,m/s; d 为管道内径,m。沿程阻力系数 λ,按公式(6)计算:

$$\lambda = 0.316\, Re^{-0.25} \tag{6}$$

式中: Re 为液体雷诺数,可按式(7)计算:

$$Re = vd/\eta \tag{7}$$

式中: η 为液体的运动黏度,m^2/s,水的运动黏度取 1.31×10^{-6} m^2/s。液体流速 v 按公式(8)计算:

$$v = q/(0.25\pi d^2) \tag{8}$$

式中: q 为管道内流量,m^3/s; p 为管道压力,Pa。

输水管道弯头的局部压力损失 ΔP_2 可按公式(9)计算:

$$\Delta P_2 = \xi \rho v^2 / 2 \tag{9}$$

式中: ξ 为局部阻力系数,90°弯角时取 1.12。

输水管道总压力损失计算。输水管道的总压力损失 ΔP 可按式(10)计算:

$$\Delta P = \Delta P_1 + N\Delta P_2 \tag{10}$$

式中,N 弯头数量。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2　煤层控制水力压裂关键技术

2.1　煤层控制水力压裂优化软件设计

煤层控制水力压裂优化设计的目的，是预测水力压裂裂缝扩展过程、水力压裂关键参数及范围，为压裂设计和施工提供指导[9-10]。开发的煤层水力压裂数值模拟与优化设计软件可以对具体地层的压裂施工过程和裂缝形态进行预测，指导水力压裂优化设计和施工。该软件从地层条件出发，以最佳的压裂效果为目标，通过不断自动调整施工规模、排量等参数，设计出能达到优化目标的最优施工方案。

根据煤矿井下压裂特点，有 2 种设计模式：①压裂水平半径为优化目标，优化压裂施工时间、压裂排量、压裂规模等参数；②以瓦斯抽采达标时间或瓦斯抽采量为优化目标，优化施工时间、施工排量、施工液量、压裂半径等参数，引入神经网络模型算法，遵循以数据为中心、可视化操作为主体的原则，参照国际流行软件的设计风格和操作规范，模块化设计，包括统一管理和数据录入、处理、输出等模块。

2.2　水力压裂孔封堵技术

煤层水力压裂与常规油气压裂井不同，一般为上向孔和近水平孔，要求封堵质量高、封堵成功率高、可操作性强，压裂孔的有效封堵是煤矿井下控制水力压裂的关键环节。

1) 上向压裂孔的混合水泥浆封孔结构及方法。上向高承压钻孔的混合水泥浆封堵结构如图 1 所示。封堵方法包括在煤岩体上钻封堵孔，并在封堵孔内继续用略小钻头钻进形成压裂孔，成孔后将如图 1 所示的封堵结构送入孔中，使压裂管的出水孔深入压裂孔中，在压裂管上紧套木质锥套并封堵在压裂孔孔口。在封堵孔的孔口 1 m 段内用聚氨酯封孔并固结 30 min，再由注浆管向封堵孔内通过注浆泵灌注 525 标号以上的混合水泥浆(水泥+石膏，灰水质量比 2.5∶1.0)，直至返浆管返浆，停止注浆并关闭截止阀，并固结 48 h，即完成压裂孔封堵。这种封堵结构简单、操作方便，封堵成功率高、效果好，适用于仰角大于 5°，特别是大仰角压裂孔的封堵。

2) 近水平压裂孔封孔结构及方法。近水平压裂孔封孔结构如图 2 所示。包括在压裂孔孔口形成扩大孔孔径约 1.5 m，扩大孔与压裂孔内切封堵时将注浆管和压裂管送入压裂孔中和将返浆管送入扩大孔中，使三者的管口位于扩大孔孔口外部，返浆管

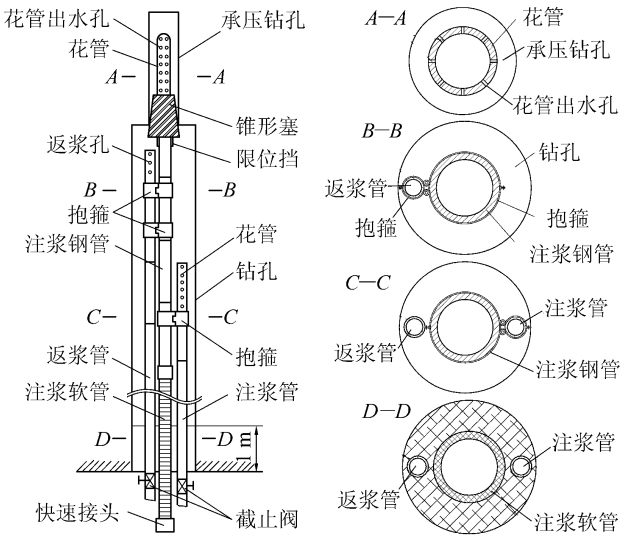


图 1　高承压钻孔混合水泥浆封堵结构

的管口高于扩大孔的上母线。用聚氨酯在扩大孔的孔口部 1 m 内形成一封孔段，由注浆管向高承压钻孔内灌注膨胀水泥浆并固结 48 h。封孔结构由内封孔段和外封孔段组成，外封孔段直径大于内封孔段，上母线高于内封孔段上母线，外封孔段上一部分与内封孔段同步灌注水泥浆形成。该封孔方法简单，封孔效率高、效果好，可有效消除收缩缝对封孔密封效果的影响，承压能力高，适用于仰角小于 5°的近水平压裂孔封堵。

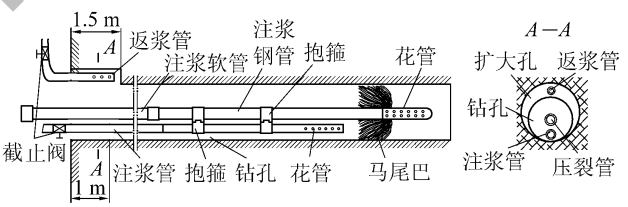


图 2　近水平高承压钻孔封堵结构

2.3　水力压裂影响范围探测

由于煤矿井下对水力压裂影响范围准确识别的需求，需要对压裂水分布范围进行有效探测，为瓦斯抽采孔的安全施工提供保障。油气开采行业已形成了较为完善的压裂范围诊断技术，如微地震技术直接近井筒监测和分布式声传感测控技术(DAS)等[11-12]，由于煤层赋存的地质特征和精确控制的需要，上述监测方法并不适用于煤矿。

根据瞬变电磁对水体、金属管道等低阻体反映灵敏的特点，可采用该方法对煤层水力压裂范围进行探测。在压裂作业结束后未排水期间，压裂水存储在煤层中，此时煤层与周围煤岩相比电阻率呈低阻状态。使用瞬变电磁仪器天线中的接收回线，接

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

收二次磁场衰减曲线，再将衰减曲线转换为视电阻率，瞬变电磁法视电阻率为全空间地层导电性的综合反映，根据仪器时窗大小、频率等参数，进行时空转换得到视深度值。在压裂作业后进行扫描，可以确定目标煤层含水分布情况，进而判断压裂水分布范围。

3　应用实例及效果分析

3.1　东林煤矿 3604E2 工作面控制水力压裂

东林煤矿位于重庆市万盛区，为煤与瓦斯突出矿井，3604E2 工作面水力压裂目标层为 6 号煤层，开采面积 3.8×10^4 m^2，埋深 370～510 m，平均煤厚 1.1 m，平均倾角 22°，煤层破坏类型为Ⅱ、Ⅲ类，平均孔隙率 3.35%，煤层普氏系数 $f=0.4$，原始瓦斯含量 15.6～16.4 m^3/t。

3604E2 工作面压裂泵放置于-200 m 茅口抽采巷，压裂孔为上向穿层孔，止于 6 号煤层顶板以上 0.5 m，采用混合水泥浆封孔结构及方法封孔，封堵至 6 号煤层底板。共有压裂钻孔 10 个(设计 12 个，其中 2、6 号孔作废)，孔深 43.6～75.38 m，孔径 75 mm，钻孔压裂半径 40 m。

根据上述基本参数，计算得单孔压入水量约为 240.5 m^3，破裂压力约为 30.1 MPa，并以压裂水平半径为目标，用开发的煤层控制水力压裂优化设计软件进行了计算，算得单孔持续压裂时间为 8.35 h。选择 HTB-500 型煤矿井下压裂泵组，压裂泵挡位为 1 挡起裂、2 挡保压。

工作面压裂压力 26～38 MPa，压裂时高压水流量 12～24 m^3/h，单孔压裂时间一般在 8.3～31.5 h，总压入水量 2 646 m^3，平均单孔压入水量 260.6 m^3，走向影响半径 40～120 m，倾向影响半径 30～60 m。在压裂实施过程中，借助施工的穿层抽采孔较准确地考察了水力压裂半径，最小影响半径与设计基本一致，出现压裂半径较大的情况是由煤层中存在的天然或采动影响产生的裂隙所致。

压裂作业后将水力压裂孔作为抽采孔，对 3604E2 工作面进行瓦斯抽采，各抽采孔瓦斯抽采情况及瓦斯抽采流量分别如表 1、图 3 所示。结果显示，水力压裂后瓦斯抽采流量有了大幅度提升，30 d 内平均单孔瓦斯抽采流量在最低达到 0.06 m^3/min，日均单孔最低瓦斯抽采流量 86 m^3，最高达 201 m^3，表明水力压裂后煤层透气性得到了大幅提升，瓦斯抽采效率大幅提高。

表 1　水力压裂钻孔瓦斯抽采情况

孔号	标准流量/($m^3\cdot min^{-1}$)	抽采负压/kPa	体积分数/%	单孔总量/m^3	平均流量/($m^3\cdot d^{-1}$)
1	0.101～0.162	26～56	82～95	6 499	186
3	0.107～0.164	26～56	88～96	6 683	191
4	0.063～0.114	26～56	55～90	4 160	119
5	0.062～0.125	26～56	62～85	4 291	123
7	0.101～0.164	24～54	85～96	6 751	193
8	0.098～0.164	24～54	83～95	6 429	184
9	0.109～0.148	24～54	84～95	6 534	187
10	0.067～0.164	24～54	65～96	6 363	182
11	0.102～0.166	24～50	82～96	6 605	189
12	0.077～0.169	24～50	66～97	5 677	162

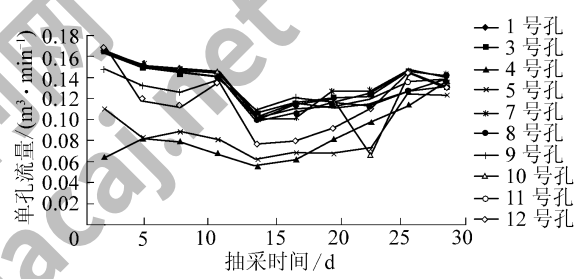


图 3　2013 年 9、10 月压裂孔瓦斯流量曲线

3604E2 工作面若按半径 5 m/个布置穿层水力割缝钻孔，3604E2 段工作面面积约 3.8×10^4 m^2，需要布置 1 520 个钻孔约 11 万 m 钻尺，相当于东林煤矿 2013 年 1—9 月的总钻尺量。在回风巷采用本层下向钻孔治理瓦斯，按 1.5 m/个共需布置 200 个钻孔，约 26 000 m 钻尺，单台钻需施工时间为 10 个月。控制水力压裂后，大幅降低了抽采钻孔工程量、提高了瓦斯抽采效率。

3.2　盐井一矿石门控制压裂影响范围监测

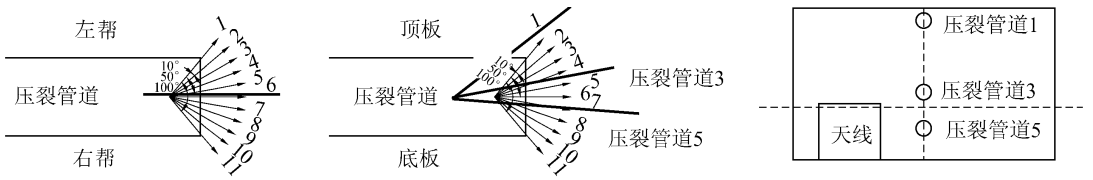
盐井一矿位于重庆市天府矿区，为煤与瓦斯突出矿井，为快速揭开-150 m 二石门的 K_4 煤层，实施了控制水力压裂。K_4 煤层赋存于大堡顶以南一带山地，地面标高+470—+520 m，煤层厚 1.5～1.9 m，赋存稳定，煤层倾角 36°～39°，直接顶泥岩和直接底板均为泥岩。

根据盐井一矿煤层赋存情况，在压裂施工作业前后各进行一次目标区域瞬变电磁法探测。选用 YCS-40 瞬变电磁仪，瞬变电磁法探测采用重叠回线装置。发射线框采用多匝 1 m×1 m 矩形回线。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

根据压裂的经验，压裂范围应沿着煤层围绕压裂孔分布，半径为 20～30 m。为了探测出压裂范围，本次试验在-150 m 二石门正前方，布置水平和垂直 2 个方向各 11 条测线和 1 条测线。水平方向扫描左右各 50°，每 10°一个测点，每条测线共 11 个测点。垂直方向相似，布置 1 条测线，扫描上下各 50°范围，每 10°一个测点，每条测线共 11 个测点，测点布置如图 4 所示。根据 K_4煤层距离-150 m 二石门之间距离 9.5～31.4 m，设计发射天线 2 匝、接收天线为 3 匝、发射机频率 75 Hz、发射电流限制为 2.5 A，将盲区控制在 10 m 以下。

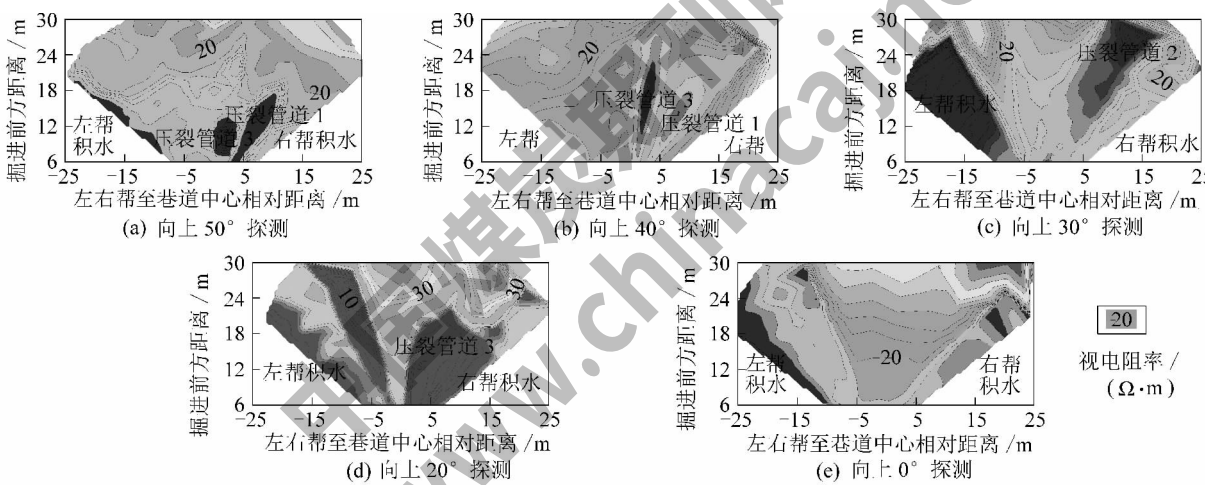
根据以上试验方案，对盐井一矿 K_4煤层-150 m 二石门水力压裂压裂范围进行了探测试验。以水平向上相交角 0°～50°为例，对测试结果进行解释分析。水平向上 0～50°测线瞬变电磁探测视电阻率剖面如图 5 所示，图中深色区域代表低阻体区，可能存在压裂水或低阻体，浅色区域代表高阻体区，为煤岩层或顶底板区等高阻体区域。



(a) 横向扇形探测布置　(b) 纵向扇形探测布置　(c) 天线布置方式断面图

1-11 为测线方向

图 4　瞬变电磁法测点布置示意



(a) 向上 50° 探测　(b) 向上 40° 探测　(c) 向上 30° 探测

(d) 向上 20° 探测　(e) 向上 0° 探测

图 5　压裂后瞬变电磁探测视电阻率剖面

从图 5 中可以看出：①浅部盲区降至 7 m 以下，有效探测范围为 6～30 m，有效探测区域覆盖水力压裂煤层区；②在目标煤层加密抽道，实现了对目标区电阻率情况的充分反映；③能清楚地探测到压裂管道和两侧的积水区，说明采用瞬变电磁法对低阻体区分非常有效；④根据压裂管道的位置，剔除压裂管道低阻区影响，可以判断压裂水主要分布在水平向上 0°～30°、水平向上 50°附近，压裂区域分布与管道位置分布对应关系明显，压裂区域长度约为 22 m，压裂区域宽度为 5～12 m。

3.3　应用效果分析

截至 2013 年 12 月，井下控制水力压裂煤层增透技术在重庆能源集团所属 24 对矿井进行了应用，应用在穿层条带、穿层网格水力压裂、本煤层及石门揭煤工程中，各矿井水力压裂前后穿层、顺层单孔抽采瓦斯体积分数提高 20%以上，单孔瓦斯抽采量提高了 5 倍以上，个别钻孔瓦斯抽采量达到 3×10^4 m^3，部分工作面瓦斯抽采钻孔工程量减少了 1/3，采掘工作面单产单进有了很大提高，如松藻煤矿半煤巷掘进单进由 60 m/月提高到现在的 90 m/月[13]。

(下转第 122 页)

参考文献:

[1] 张新民,张遂安.中国的煤层甲烷 [M].西安:陕西科学技术出版社,1991.

[2] 张新民,庄　军,张遂安.中国煤层气地质与资源评价 [M].北京:科学出版社,2002.

[3] Vicki A Hollub,Paul S Schafer.A guide to coalbed methane operations [R].Chicago:Gas Research Institute,1992.

[4] Jerrald L Saulsberry,Paul S Schafer,Richard A Schraufnagel.A guide to coalbed methane reservoir engineering [R].Chicago:Gas Research Institute,1996.

[5] 张遂安.有关煤层气勘探过程中的理论误导剖析 [J].中国煤层气,2004(1):9-10,33.

[6] 张　群,冯三利,杨锡禄.试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略 [J].煤炭学报,2001,26(3):230-235.

[7] 王　涛,黄文涛.江西省丰城矿区煤层气储层特征 [J].江西地质,2001(2):125-127.

[8] 陈兆山.阜新盆地刘家区煤层气储层特征及产出特点 [J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2002,21(5):567-570.

[9] 李小彦,钟铃文.乌鲁木齐河东河西矿区煤层气储层特征 [J].中国煤田地质,2003(5):19-21.

[10] 刘贻军,娄建青.中国煤层气储层特征及开发技术探讨 [J].天然气工业,2004,24(1):68-71,108.

[11] 杨胜来,杨思松,高旺来.应力敏感及液锁对煤层气储层伤害程度实验研究 [J].天然气工业,2006,26(3):90-92.

[12] 鲜保安,蒋卫东,杨程富,等.欠平衡钻井技术在保护煤层气储层中的应用 [J].天然气工业,2008,28(3):59-60.

[13] 郭　徽,房新亮,王雪颖,等.煤层气井排采时储层渗透率变化特征研究 [J].煤炭科学技术,2013,41(1):82-83,88.

[14] 邵先杰,董新秀,汤达祯,等.煤层气开发过程中渗透率动态变化规律及对产能的影响 [J].煤炭学报,2014(S1):146-151.

[15] 裴柏林.煤层气储层三维渗透率变化规律实验研究 [J].煤田地质与勘探,2013,41(4):26-30.

[16] 接铭训.鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景 [J].天然气工业,2010,30(6):1-6,121.

[17] 张明山.韩城 WL1 井组煤层气地质特征 [J].中国煤炭地质,2009,21(10):31-33.

[18] 张遂安,曹立虎,杜彩霞.煤层气井产气机理及排采控压控粉研究 [J].煤炭学报,2014,39(9):1927-1931.

[19] 冯文光.煤层气藏工程 [M].北京:科学出版社,2009:68-70.

[20] 刘新福,綦耀光,胡爱梅,等.煤层气井气水两相流入动态关系研究 [J].中国矿业大学学报,2011,40(4):561-565,591.

(上接第 118 页)

4　结　　论

1) 提出了煤层控制水力压裂概念,即通过压入水量、压力和影响范围监测来控制压裂过程,定点定向定区域压裂,实现目标区域煤层的增透,并降低对非目标区域煤岩层的影响。

2) 煤矿井下水力压裂数值模拟与优化设计软件,可以对具体地层的压裂施工过程和裂缝形态进行预测,指导控制水力压裂优化设计和施工。

3) 开发了适用于控制压裂的上向孔和近水平孔的封孔方法及封堵装置,保证了高承压状态下的钻孔的封孔质量。

4) 应用结果表明,水力压裂前后穿层、顺层单孔钻孔瓦斯抽采体积分数均有 20%以上的提高,单孔瓦斯抽采量提高了 5 倍以上,个别钻孔瓦斯抽采量达到 3×10^4 m^3,部分工作面瓦斯抽采钻孔工程量减少了 1/3,采掘工作面单产单进大幅提高。

参考文献:

[1] 赵　伟.我国煤与瓦斯突出事故现状及防治对策 [J].煤炭科学技术,2014,42(6):15-18.

[2] 肖知国,王兆丰,陈立伟.煤层高压注水防治煤与瓦斯突出效果考察及机理分析 [J].河南理工大学学报:自然科学版,2010,29(3):287-292.

[3] 张希宇.水力割缝防止掘进工作面瓦斯突出的机理研究 [D].太原:太原理工大学,2012.

[4] 王志磊,王　凯,梁安民."三软"突出煤层穿层钻孔水力压裂增透抽采瓦斯技术研究 [J].煤炭技术,2014,33(5):34-36.

[5] 程远平,刘洪永,赵　伟.我国煤与瓦斯突出事故现状及防治对策 [J].煤炭科学技术,2014,42(6):15-18.

[6] 段银鹿,李　倩,姚韦萍.水力压裂微地震裂缝监测技术及其应用 [J].断块油气田,2013,20(5):644-648.

[7] 林柏泉,孟　杰,宁　俊,等.含瓦斯煤体水力压裂动态变化特征研究 [J].采矿与安全工程学报,2012,29(1):106-110.

[8] 葛兆龙,梅绪东,卢义玉,等.煤矿井下水力压裂钻孔封孔力学模型及试验研究 [J].岩土力学,2014,35(7):1907-1913,1920.

[9] 姜秀雷,孟　杰,陈延可,等.水力压裂影响范围数值模拟研究 [J].煤矿安全,2013,44(2):3-6.

[10] 陈　鹏.Ⅰ、Ⅱ类高煤阶煤水力压裂参数优化及软件发开 [D].焦作:河南理工大学,2012.

[11] 薛莉莉.煤层气储层压裂数值模拟技术研究 [D].青岛:中国石油大学(华东),2009.

[12] 贾利春,陈　勉,金　衍.国外页岩气井水力压裂裂缝监测技术进展 [J].天然气与石油,2012,30(1):44-47.

[13] 沈大富,郭臣业,覃　乐,等.煤矿井下控制水力压裂增透与瓦斯抽采关键技术研究及应用 [R].重庆:重庆市能源投资集团科技有限责任公司,2014.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net