

文章编号: 1001-1986(2017)03-0045-04

低透煤层井下长钻孔水力压裂增透技术

闫志铭^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083;
2. 阳泉煤业(集团)有限责任公司, 山西 阳泉 045000)

摘要: 针对我国低透气性煤层普遍存在瓦斯抽采效果差的现状, 提出了利用大直径长钻孔水力压裂对煤层进行增透的技术措施, 探讨了长钻孔水力压裂增透机理, 并进行了煤矿井下煤层水力压裂瓦斯抽采试验。在成功施工顺层长钻孔的基础上, 研发了一套适合井下水力压裂施工的快速封孔工具组合, 分析了压裂过程中参数变化规律, 提出了水力压裂影响范围、压裂效果和瓦斯抽采效果评价方法, 并进行了考察和评价。研究表明: 该技术克服了传统井下水力压裂存在的封孔质量差、压裂影响范围小等问题, 压裂后煤层透气性系数提高了 2.67 倍, 压裂最大影响半径达到了 58 m, 压裂后连续抽采 130 d 累计抽采纯瓦斯量为 $31.39 \times 10^4 \text{ m}^3$, 日最高抽采量 2668 m^3 , 瓦斯体积分数平均 70.05%, 百米钻孔瓦斯抽采纯量达到 $0.55 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

关键词: 低透煤层; 水力压裂; 顺层长钻孔; 增透技术; 效果考察

中图分类号: TD357.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.03.008

Hydraulic fracturing technology for permeability improvement through underground long borehole along coal seam

YAN Zhiming^{1,2}

(1. Faculty of Coal Resources & Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
2. Yangquan coal industry (Group)Co. Ltd., Yangquan 045000, China)

Abstract: Aiming at the general poor gas drainage effect of coal seams with low permeability in China, the paper put forward the technical measures of hydraulic fracturing for permeability improvement through large-diameter long boreholes, the mechanism of permeability improvement by hydraulic fracturing in long boreholes was discussed, and gas drainage test using hydraulic fracturing in coal seams in underground coal mines was carried out. On the basis of successful drilling of long boreholes along coal seams, a rapid sealing tool assembly suitable for underground hydraulic fracturing operation was developed. The change law of parameters during fracturing was analyzed, the method for evaluation of the influence range of hydraulic fracturing, the effect of hydraulic fracturing and gas drainage was put forward, investigated and assessed. The research indicated that the technology had overcome the problems existing generally in traditional underground hydraulic fracturing, such as poor hole-sealing quality and small influence range of fracturing. After fracturing, the permeability coefficient of seam increased by 2.67 times, the maximum influence range of fracturing reached 58 m, during 130 d totally $31.39 \times 10^4 \text{ m}^3$ pure gas was drained with the maximum daily extraction of 2668 m^3 and the mean gas volume fraction of 70.05%, the drained pure gas quantity of 100 m of borehole was up to $0.55 \text{ m}^3/\text{min}$.

Keywords: coal seam with low permeability; hydraulic fracturing; long borehole along coal seam; technology for improving permeability; effect investigation

我国绝大多数高瓦斯突出矿井主采煤层属于低透气性煤层, 瓦斯抽采达标所需时间长, 区域瓦斯治理难度较大。寻找一种有效提高煤层透气性的方法, 对低透气性煤层瓦斯治理具有重要意义。水力压裂技术是石油开发领域改造油气储层条件的增产

措施之一, 也是地面煤层气开发的主要增产强化手段。原煤炭科学研究院抚顺分院在 1965 年首次通过地面钻孔对煤层实施水力压裂, 取得显著效果^[1]。近年来, 随着井下大功率大排量压裂设备的研制成功, 以水力压裂为代表的水力化增透措施得到迅速

收稿日期: 2016-12-06

作者简介: 闫志铭(1969—), 男, 山西阳泉人, 博士研究生, 高级工程师, 从事瓦斯治理方面研究工作. E-mail: yan_zm@sohu.com

引用格式: 闫志铭. 低透煤层井下长钻孔水力压裂增透技术[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(3): 45-48.

YAN Zhiming. Hydraulic fracturing technology for permeability improvement through underground long borehole along coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(3): 45-48.

发展^[2-6]，苏现波等^[7]、王魁军等^[8]先后着力于煤矿井下穿层和顺层瓦斯抽采钻孔的水力压裂增透技术的研究，该技术在河南平顶山、鹤壁、焦作、义马，安徽淮南等矿区进行应用，并取得了较好的效果。李全贵等^[9]提出了定向钻孔定向水力压裂技术，借助定向钻孔增加辅助自由面对水力压裂孔产生的裂隙具有导向和加速扩展的作用，使整个压裂区域压裂后形成较大范围的卸压增透区。林柏泉等^[10]、翟成等^[11]在定向压裂技术基础上又提出了高压脉动水力压裂卸压增透技术，通过脉动泵产生周期性脉冲射流，在煤层内形成周期性的张压应力，使煤层中的原生裂隙不断贯通、延伸，取得了较好效果。郭红玉^[12]论述了井下水力压裂的多重功效，建立了“应力应变-煤体结构-渗透率”耦合关系，为井下水力压裂机理研究奠定了基础。富向^[13]进行了井下点式水力压裂技术研究并进行了工业性试验。王耀峰等^[14]通过实施先割缝后压裂的方法，提出了基于导向槽的定向水力压裂增透技术。

传统的井下水力压裂增透技术多采用井下穿层钻孔方式，存在着煤层段钻孔长度有限、封孔质量差、压裂影响范围小等缺陷，在压裂工艺方面尚处于摸索阶段。笔者依据水力压裂的作用机理，在压裂钻孔布置、压裂工艺方面进行了改进并进行了工业性试验，综合分析顺层长钻孔水力压裂效果，以期为低透气性煤层瓦斯治理工作提供技术借鉴。

1 井下长钻孔水力压裂增透机理

井下长钻孔水力压裂是利用定向钻进设备，借助先进的钻探工艺和随钻测量系统控制钻孔轨迹，在煤层中施工定向长钻孔，利用专用压裂设备通过钻孔向煤层高压注水，当水压入的速度远超过煤层的自然吸水能力时，由于流动阻力的增加，注入煤层的水压逐渐升高，当孔内压力增高至大于储层破裂所需的压力时，储层就会形成一条或数条不等规模的裂缝，当继续注入液体后，裂缝就会向远离钻孔的方向延伸和扩展，直到注入速度等于储层渗透速度时，裂缝才会停止延伸与扩展。长钻孔水力压裂增透技术的显著特点是充分利用定向钻进技术的

优势，以水作为动力，改变钻孔周围煤岩体的应力状态，在钻孔周围形成大面积卸压区域，增大附近煤层透气性，提高瓦斯抽采效果，从而达到对低透气性煤层增透的目的。

2 试验区概况

选择阳煤集团新景公司 8100 m 保安区南六底抽巷南段作为水力压裂试验地点，以主采 3 号煤层作为压裂煤层，煤层平均厚度 2.25 m，宏观煤岩成分主要为亮煤、暗煤和丝炭，镜煤含量少。受水平构造应力影响，底部煤层碎软。煤层直接顶板以砂质泥岩为主，平均厚度 1.11 m；基本顶为发育稳定的细粒砂岩，平均厚度 6.17 m。基本顶上部为灰黑色砂质泥岩，平均厚度 1.80 m。直接底板为灰黑色砂质泥岩，平均厚度 2.48 m。基本底为深灰色细粒砂岩，平均厚度 2.40 m，基本底下部发育极不稳定的 4 号煤，煤层厚度平均 0.05 m。

现场测定的 3 号煤层透气性系数为 0.018~0.1377 m²/(MPa²·d)；瓦斯衰减速度快，钻孔百米流量衰减系数为 0.0687~1.5942 d⁻¹，钻孔抽采浓度低，附近普通穿层钻孔瓦斯抽采体积分数为 0.2%~1.8%；煤层瓦斯含量为 15.95 m³/t，煤层瓦斯压力为 1.30~2.26 MPa。煤层较为破碎，煤的坚固性系数 f 值为 0.77~0.81，煤体破坏类型以 III 类为主。总体而言，试验点 3 号煤层属于典型的低透、碎软煤层，透气性极差，采用常规方法开展瓦斯防治，其效果较差。

3 水力压裂试验

3.1 长钻孔布置

压裂长钻孔设计在煤层底板开孔，开孔倾角 12°，方位角 4°，利用 ZDY6000LD(F)型定向钻机进行钻探施工，穿过底板岩层后进入煤层，借助 YHD2-1000T(A)型随钻测量系统精确控制钻孔轨迹。长钻孔实钻轨迹如图 1 所示。钻孔一开钻进至 35 m(图 1 中封隔器 1 附近)结束，扩孔至 193 mm 后下入 Φ146 mm 钢套管，使用封孔水泥注浆固孔。二开钻进采用 Φ98 mm 复合钻头，钻进至 495 m 处终孔，然后利用 Φ120 mm 钻

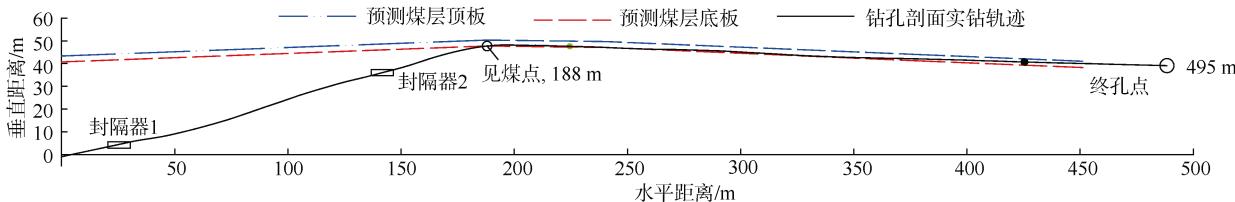


图 1 长钻孔实钻轨迹图

Fig.1 Trajectory of long borehole

头对二开孔段进行全部扩孔。钻孔总长度 495 m, 其中岩层段长 188 m, 煤层段长 307 m。

3.2 压裂施工工艺及关键技术

井下水力压裂施工划分为压裂前、压裂中、压裂后 3 个阶段, 主要包含通孔、洗孔、封孔、试压、注水压裂、关泵、保压、排水等诸多环节。

压裂长钻孔钻探施工完成后, 立即进行通孔及洗孔作业, 清除孔内沉渣, 安装好压裂设备及视频监控系统, 并对压裂设备进行试车, 采用中煤科工集团西安研究院有限公司研发的井下水力压裂封孔工具进行封孔, 该套封孔工具由引鞋、单流阀、滑套、封隔器、高压管柱及孔口安全控制阀门组成(图 2)。利用钻机将带有封隔器的工具送至坐封位置后, 安装孔口安全阀门, 连接压裂泵高压注水, 使封隔器自膨胀完成座封。

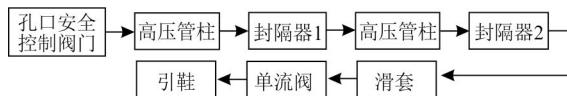


图 2 钻孔封孔工具组合示意图

Fig.2 The diagram of sealing tool composition

试验采用 K341 扩张式封隔器, 主要由上接头、锁紧机构、密封原件、中心管、浮动头、下接头等部件组成。坐封时, 封隔器下入井内设计位置后, 从油管内打压, 液体从中心管进入胶筒内囊腔, 靠液压撑开和膨胀胶筒, 使其外表面紧贴井筒内壁, 从而密封油套环形空间, 停止打压后, 胶筒内置单流阀保持封隔器坐封状态。解封时, 上提管柱剪断解封销钉, 中心管与胶筒发生相对位移, 封隔器内外压力平衡即解封。本次井下试验通过向孔内注水打压检测封孔效果。经测试, 采用该套工具能在 10 min 内实现对钻孔的快速封孔, 最大坐封压力达到 70 MPa, 各项指标能满足煤矿井下高压力、大排量水力压裂施工对封孔质量的要求, 保证水力压裂工作顺利进行。压裂结束后该套封孔设备可以回收并重复使用, 节省了水力压裂施工成本。

压裂过程密切监测泵注压力和注入流量变化情况, 根据压力的变化调节压裂泵档位, 详细记录时间、压力、排量等数据。压裂初期, 泵注压力和注入流量持续上升, 直至煤层发生初始破裂, 随后泵注压力出现“快速下降-缓慢上升-下降”的现象, 直至压裂范围扩大, 出现下一次破裂为止。施工人员在远程操作台密切监视压裂孔口油管压力和钻孔周围情况, 观测巷道变形及渗水情况。瓦斯检测员定时对巷道内甲烷浓度进行检测, 当注水量达到设计要求时下达压裂结束指令, 压裂结束后停泵断电, 关闭孔口阀门进行保压作业。由技术人员和瓦斯检测员进入压裂场地进行安

全检查, 确定巷道安全后方可进入。

压裂作业结束后, 孔内压力较高, 直接排水会带出大量瓦斯, 造成瓦斯超限事故; 同时孔内处于高压状态时排水, 孔内压力降低过快, 容易产生塌孔、堵孔等现象, 影响瓦斯抽采效果。因此, 压裂结束后应采取保压措施使孔内压力缓慢降低。本次保压共持续 14 d, 当压力降到一定程度并基本保持稳定后, 打开孔口排水, 将孔口管柱与气水分离器连接, 将气水分离器与抽采管路连接进行正常的瓦斯抽采。

3.3 压裂数据分析

压裂钻孔封孔完成后开始注水。本次水力压裂累计注水量 1 510 m³, 平均注水量 30 m³/h。注水过程中监测瞬时最大注入流量为 56.45 m³/h, 对应注入压力为 15.7 MPa, 瞬时注入最大压力为 26.09 MPa。当压力增大至 15.99 MPa 时, 煤岩体产生初始破裂, 注水量部分填充至裂缝中, 压力降低、基本稳定或呈现轻微的锯齿状周期波动。持续注水后, 压力不断升高, 当压力升至 17.4 MPa 时, 煤层发生二次破裂, 压力再次降低; 继续注水过程中多次发生煤层破裂情况, 最大压力达到 26.09 MPa, 直至周期性“锯齿状”波动达到稳定。

4 效果考察与分析

4.1 压裂效果考察

为了考察水力压裂影响范围和实施效果, 在压裂钻孔周围布置 12 个钻孔。对压裂前后煤层瓦斯含量、全水分、煤层透气性系数等进行了测试。经测试, 未受压裂影响的原始煤层全水分质量分数为 2.20%~3.28%, 平均 2.82%, 受水力压裂影响区域煤层全水分质量分数为 2.75%~14.06%, 平均 6.72%; 压裂后煤层全水分是压裂前的 2.38 倍, 以煤层全水分参数作为考察指标, 最大水力压裂影响半径达到 58 m。压裂前钻孔测定的透气性系数为 0.009 7 m²/(MPa²·d), 而压裂影响范围内测定的煤层透气性系数为 0.025 9 m²/(MPa²·d)。压裂后透气性系数比压裂前提高了 2.67 倍。

4.2 瓦斯抽采效果

采用 GJG100H(C)型管道红外甲烷传感器和 GD4 型瓦斯抽采多参数传感器对水力压裂钻孔瓦斯抽采参数进行监测。监测瓦斯抽采体积分数为 58.00%~84.63%, 平均 70.05%, 工况条件下混合流量为 2.17~2.58 m³/min, 平均 2.38 m³/min, 抽采纯瓦斯量为 1.70~1.80 m³/min, 平均 1.68 m³/min。连续抽采 130 d 累计抽采纯瓦斯量为 31.39 万 m³, 日瓦斯抽采纯量在 658~2 668 m³, 平均 2 415 m³(图 3), 百米钻孔瓦斯抽采纯量为 0.40~0.60 m³/min, 平均 0.55 m³/min, 抽采量整体比较稳定, 呈缓慢下降趋势(图 3), 从测定

的瓦斯含量大小来看,压裂前瓦斯含量为 $12.87\sim15.95 \text{ m}^3/\text{t}$,平均 $14.41 \text{ m}^3/\text{t}$;水力压裂增透试验后抽采 130 d 后,测定的压裂影响区域内煤层残存瓦斯含量为 $8.40\sim11.82 \text{ m}^3/\text{t}$,平均 $9.47 \text{ m}^3/\text{t}$ 。平均瓦斯含量降低了 $4.94 \text{ m}^3/\text{t}$,降幅达到 34.28%。这充分说明了长钻孔水力压裂对煤层增透效果十分明显。

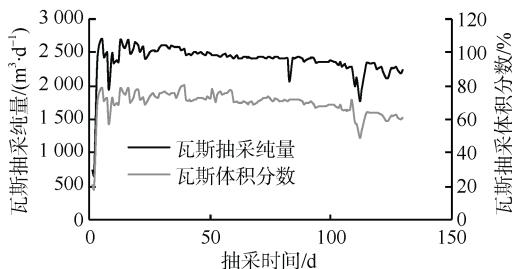


图 3 瓦斯抽采纯量和体积分数变化曲线

Fig.3 Change curve of drained pure gas quantity

5 结 论

a. 在阳泉新景煤矿碎软低渗煤层实施了自煤层底板巷开孔向煤层定向钻探,钻探深度 495 m,其中煤层段长度为 307 m,实现了矿区碎软低渗煤层钻探突破。

b. 研发的井下水力压裂作业的专用封孔工具,满足煤矿井下高压力、大排量水力压裂施工对封孔质量的要求。

c. 长钻孔水力压裂后煤层透气性系数提高了 2.67 倍,最大影响半径达到 58 m,压裂钻孔平均日瓦斯抽采纯量达到 2415 m^3 。平均百米钻孔瓦斯抽采纯量达到 $0.55 \text{ m}^3/\text{min}$,瓦斯抽采体积分数平均达 70.04%,煤层瓦斯含量由 $14.41 \text{ m}^3/\text{t}$ 降低为 $9.47 \text{ m}^3/\text{t}$,降幅达 34.28%,煤层增透效果十分明显。

d. 井下长钻孔水力压裂增透技术为低透气性煤层瓦斯综合治理提供了一条可行的技术途径,具有较好的推广前景。

参考文献

- [1] 张有狮. 煤矿井下水力压裂技术研究进展及展望[J]. 煤矿安全, 2012, 43(12): 163-172.
ZHANG Youshi. Research progress and prospect of hydraulic fracturing technologies in coal mine underground[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(12): 163-172.
- [2] 吕有厂. 水力压裂技术在高瓦斯低透气性矿井中的应用[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(7): 102-107.
LYU Youchang. Application the hydraulic fracturing technology in the high pressure and low permeability mine[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(7): 102-107.
- [3] 袁亮,林柏泉,杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方法[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45-49.
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and

development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 45-49.

- [4] 刘晓,张双斌,郭红玉. 煤矿井下长钻孔水力压裂技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 42-44.
LIU Xiao, ZHANG Shuangbin, GUO Hongyu. Research on hydraulic fracturing technology of long borehole in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(3): 42-44.
- [5] 宋生印,韩宝山. 新集煤层气开发试验井水力压裂增产改造[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(1): 27-30.
SONG Shengyin, HAN Baoshan. The hydraulic fracture stimulation for pilot wells located in Xinji coal area[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(1): 27-30.
- [6] 韩保山. 低渗煤层压裂机理及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 25-29.
HAN Baoshan. Research on fracturing mechanism of low permeability coal seam and application of surface CBM drainage[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 25-29.
- [7] 苏现波,刘晓,倪小明,等. 煤矿井下钻孔水力压裂增透抽采瓦斯工艺:CN 101403314[P]. 2009-04-08.
- [8] 王魁军,富向,曹垚林,等. 穿层钻孔水力压裂疏松煤体瓦斯抽放方法:CN101581231[P]. 2009-11-18.
- [9] 李全贵,翟成,林柏泉,等. 定向水力压裂技术研究与应用[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(6): 735-739.
LI Quangui, ZHAI Cheng, LIN Baiquan, et al. Research and application of directional hydraulic fracturing technology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(6): 735-739.
- [10] 林柏泉,李子文,翟成,等. 高压脉动水力压裂卸压增透技术及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 452-455.
LIN Baiquan, LI Ziwen, ZHAI Cheng, et al. Pressure relief and permeability-increasing technology based on high pressure pulsating hydraulic fracturing and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 452-455.
- [11] 翟成,李贤忠,李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.
ZHAI Cheng, LI Xianzhong, LI Quangui. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1996-2001.
- [12] 郭红玉. 基于水力压裂的煤矿井下瓦斯抽采理论与技术[D]. 焦作:河南理工大学, 2011.
- [13] 富向. 井下点式水力压裂增透技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1317-1321.
FU Xiang. Study of underground point hydraulic fracturing increased permeability technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1317-1321.
- [14] 王耀峰,李艳增. 预置导向槽定向水力压裂增透技术及应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1326-1331.
WANG Yaofeng, LI Yanzeng. The technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1326-1331.