导向槽定向水力压穿增透技术研究与应用

李 艳 增[1,2]

(1. 煤科集团沈阳研究院有限公司,辽宁 沈阳 110016; 2. 煤矿安全技术国家重点实验室,辽宁 抚顺 113122)

摘 要: 基于弹性力学理论和岩石破裂准则,建立了煤层水力压裂中的二维垂直裂缝诱导应力场计算模型,得出合理布置导向槽与控制钻孔位置及压裂顺序能够实现压裂裂缝转向形成网状裂隙。基于此提出导向槽定向水力压穿增透技术,利用导向槽和控制钻孔共同定向作用可实现导向槽钻孔与控制钻孔间煤体定向水力压穿,形成贯穿裂隙并通过高压水携带出大量煤屑,从而有效地实现煤层卸压和增加煤层透气性。进而研发出导向槽定向水力压穿成套装备,阐述了导向槽定向水力压穿增透工艺。现场应用表明: 导向槽定向水力压穿技术能够有效预置导向槽,实现定向水力压穿,瓦斯抽采体积分数提高 75%,单孔瓦斯抽采量提高了 193%,区域消突措施有效。

关键词: 瓦斯抽采; 导向槽; 诱导应力; 定向水力压穿; 煤层增透

中图分类号: TD713 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)04-0050-05

Study and application of guide slot directional hydraulic pressurized penetration and permeability improved technology

Li Yanzeng[1,2]

(1. *Shenyang Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Shenyang* 110016, *China*;
2. *State Key Lab of Coal Safety, Fushun* 113122, *China*)

Abstract: Based on the elastic mechanics theory and the rock fracturing criterion, a calculation model of the two-dimensional induced stress field in the seam hydraulic fracturing was established and the rational set guide slot and the control borehole location and the fracturing sequence obtained could realize the fractured cracks changed to form net cracks. Based on the circumstances, the guide slot directional hydraulic pressurized penetration and permeability improved technology were provided, the application of the joint directional function of the guide slot and control borehole could realize the directional hydraulic pressurized penetration of the coal between the guide slot borehole and the control borehole, which would form the penetrated cracks and could clean the great coal cuttings with the high pressurized water and thus the seam pressure released and the seam permeability improved could be realized. Therefore, a completed set of the guide slot directional hydraulic pressurized penetration equipment was researched and developed and the guide slot directional hydraulic pressurized penetration and permeability improved technique was stated. The site application showed that the guide slot directional hydraulic pressurized penetration technology could effectively preset the guide slot and could realize the direction hydraulic pressurized penetration. The gas drainage volume fraction was improved by 75%, the gas drainage quantity from a single borehole was improved by 193%, the regional outburst elimination measures were effective.

Key words: gas drainage; guide slot; induced stress; directional hydraulic pressurized penetration; seam permeability improved

0 引 言

煤层气(煤矿瓦斯)属非常规天然气,是优质的清洁能源。同时,煤层气(煤矿瓦斯)也是我国煤矿重特大灾害事故的首要致灾因素。我国 95%以上的高瓦斯突出矿井都具有无采动卸压的低透气性煤

收稿日期: 2015-11-26; **责任编辑:** 王晓珍 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.04.010

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-004-001); "十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAK04B01)

作者简介: 李艳增(1982—),男,河北武强人,助理研究员,硕士。Tel: 15998279156, E-mail: lyz3144@163.com

引用格式: 李艳增.导向槽定向水力压穿增透技术研究与应用[J].煤炭科学技术,2016,44(4):50-54.

Li Yanzeng.Study and application of guide slot directional hydraulic pressurized penetration and permeability improved technology[J].Coal Science and Technology,2016,44(4):50-54.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

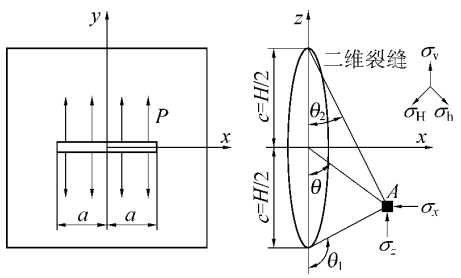
层,具有非均质性、高瓦斯、低储层压力、低渗透性和低含气饱和度等特点[1],造成单孔瓦斯抽采量低、瓦斯浓度低、抽采成本高。

国内外科研人员通常采用交叉钻孔、水力冲孔、水力压裂、深孔预裂爆破等[2-6]技术手段来增加煤层裂隙,提高煤层透气性,从而提高瓦斯抽采效率,消除煤层突出危险性。这些技术在矿井瓦斯治理中发挥了很好的作用,但多存在工程量大、工艺复杂和工程投入高、有效影响范围小等问题。经过十几年的发展,水力化煤层增透技术取得了较大进步,但每种单项增透技术都有自身的局限性。例如: 水射流割缝(或扩孔)技术在其控制范围内卸压充分、增透效果明显,但是它的影响半径小,仅有几米; 由于煤层的非均质性和煤质松软,常规水力压裂技术易形成高压异常带[7],很难保证在它的控制范围内实现均匀卸压、增透而不留空白带,压裂液浸入煤体后不易排除,煤层裂隙在较短时间内闭合[8-9],从而影响了整体的增透抽采效果,限制了该技术的应用。为充分发挥不同单项技术的长处并尽量克服其不足,实现水力压裂定向和解决局部应力异常等难题,笔者提出导向槽定向水力压穿增透技术,利用导向槽和控制钻孔共同定向作用实现导向槽钻孔与控制钻孔间煤体定向水力压穿,形成贯穿裂隙并通过高压水携带出大量煤屑,从而有效地实现煤层卸压和增加煤层透气性,同时开展了导向槽定向导控机理研究、成套设备研制并进行现场工业应用,以期获得更好的煤体致裂增透效果。

1　导向槽定向导控机理分析

由于煤岩介质的非均质性及孔隙结构分布,水压作用下煤岩的破裂过程十分复杂。根据弹性力学理论和岩石破裂准则,裂缝总是沿垂直于最小水平主应力的方向起裂,所以,钻孔周围应力场的分布决定了其水压裂缝的起裂与延伸。导向槽定向水力压穿技术需要对穿层钻孔预置导向槽,然后顺序或同步对多个钻孔进行水力压裂。先后对多个穿层钻孔进行水力压裂时,不同钻孔裂缝的产生存在先后顺序。预置导向槽或先压形成裂缝将使钻孔及裂缝周围区域内的孔隙压力重新分布,对后压裂钻孔的裂纹扩展形成诱导应力,改变后压裂钻孔裂纹周围的应力场,导致这些裂纹的扩展与延伸方向发生改变。

为了求解裂纹的诱导应力,以均质、各向同性的二维应变模型为基础,建立如图 1 所示几何模型: 平板中央一直线状裂纹(可看作短半轴→0 的椭圆的极限情形),长为 $2a$,裂纹穿透板厚,作用于裂纹面上的张力为$-P$。把裂纹的长度方向看作高度方向,即把 $x-y$ 平面转换为 $x-z$ 平面,则可得到二维垂直裂缝所诱导的应力场。



σ_H、σ_h、σ_v 分别为地层最大水平主应力、最小水平主应力及垂向主应力; H 为裂缝高度

图 1　钻孔不同方向正应力对比曲线

Fig. 1　Curves of normal stresses in different directions of the borehole

利用上述模型研究早期压裂裂缝的诱导应力属于平面应变问题,根据弹性力学理论,利用 Fourier 变换、Bessel 函数和 Titchmarsh-Busbridge 对偶积分方程的解,得到二维垂直裂缝的诱导应力如下[10-11]:

$$\sigma_x = P\frac{r}{c}\frac{c^2}{r_1 r_2}1.5\sin\theta\sin 1.5(\theta_1+\theta_2) + P\left[\frac{2r}{r_1 r_2}\cos\left(\theta-\frac{1}{2}\theta_1-\frac{1}{2}\theta_2\right)-1\right]$$

$$\sigma_z = -P\frac{r}{c}\frac{c^2}{r_1 r_2}1.5\sin\theta\sin 1.5(\theta_1+\theta_2) + P\left[\frac{2r}{r_1 r_2}\cos\left(\theta-\frac{1}{2}\theta_1-\frac{1}{2}\theta_2\right)-1\right]$$

$$\tau_{xz} = P\frac{r}{c}\frac{c^2}{r_1 r_2}1.5\sin\theta\cos 1.5(\theta_1+\theta_2)$$

由胡克定律得: $\sigma_y=\mu(\sigma_x+\sigma_z)$。同时各参数间存在如下几何关系:

$$\begin{cases} r=\sqrt{x^2+y^2} \\ r_1=\sqrt{x^2+(y+c)^2} \\ r_2=\sqrt{x^2+(y-c)^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta=\arctan\dfrac{x}{y} \\ \theta_1=\arctan\dfrac{x}{-y-c} \\ \theta_2=\arctan\dfrac{x}{c-y} \end{cases}$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

其中：σ_x、σ_y、σ_z 分别为 x、y、z 方向上的诱导应力，MPa；τ_{xz} 为 xz 平面上的诱导剪切应力，MPa；r 为裂缝面上任意一点与钻孔的距离，m；θ 为裂缝方位角，(°)；$c = H/2$，m。

从以上各式可以看出：①水力裂缝在地层中产生诱导应力场，使原始的应力场上又附加了诱导应力场。而裂缝在垂直于缝面方向所产生的诱导应力最大，在裂缝延伸方向上所产生的诱导应力最小。因此，有可能改变初始的应力状态，促使裂缝扩展方向的改变，与天然裂缝沟通形成网状裂缝结构。②在 3 个方向所形成诱导应力的大小与先形成裂缝内的净压力成正比关系，当静压力足够大时可实现对周围后期压裂裂缝转向的控制。③钻孔间距离控制水力裂缝形成诱导应力的大小，诱导应力的大小随着距裂缝面或者钻孔距离的增大而迅速降低，到达一定距离后，地应力场仍为初始状态[13]。

2　导向槽定向水力压穿增透技术及装备

2.1　导向槽定向水力压穿增透技术

预置导向槽定向水力压穿增透瓦斯抽采方法是在保障安全的前提下，通过水射流深穿透射孔、水力割缝、分支钻孔等技术在煤体中预置导向槽，然后对导向槽钻孔进行水力压裂，利用预置导向槽和控制钻孔控制压裂方向，将导向槽钻孔与周围预先设置的控制钻孔之间的煤体压穿形成贯穿裂隙，通过高压水携带出大量煤屑，钻孔控制范围内煤体卸压，有效增加了煤层透气性，同时导向槽钻孔和控制钻孔均接入抽采系统，有效提高了瓦斯抽采效果和降低抽采时间[13]。

2.2　导向槽定向水力压穿增透成套装备

导向槽定向水力压穿增透成套装备由三维旋转水射流预置导向槽系统、水力泵站、高压管汇和压穿参数远程监控系统等组成。

1) 三维旋转水射流预置导向槽系统[14] 由旋转射流喷嘴，多功能水射流喷头、螺旋辅助排渣高压钻杆、回转式高压旋转接头、煤层注水泵等设备组成，利用液压钻机通过螺旋辅助排渣高压钻杆带动水射流喷头喷嘴旋转对穿层钻孔煤层段进行预置导向槽。

2) 水力泵站。预置导向槽和定向水力压穿增透措施要求水力泵站输出高压水具有流量均匀、压力稳定、脉冲小等特点，基于上述要求选择出高压排液出口处装有高压安全阀的煤层注水泵。水力泵站的工作压力由破煤有效压力、沿程阻力损失和局部阻力损失组成。根据煤矿现场情况，选用 5 柱塞的煤层注水泵，工作压力为 45 MPa，额定流量为 200 L/min。

3) 高压管汇的选型。高压管汇主要由高压胶管总成、直通、三通、截止阀、单向阀等组成，其中高压胶管为钢丝缠绕高压胶管，带有 MA 标志，耐压应大于乳化液泵的额定压力，连接直通与三通均采用矿用 U 型卡式或其他快速接头形式。同时为减少管路压力损失，优先选择内径为 32 mm 和 25 mm 的高压胶管。

4) 压穿参数远程监控系统。能够采集系统压力、水箱水位、油位、温度、甲烷浓度，实现监控及超限报警或断电，监视作业过程和环境安全状况，同时实时监测、存储、工况识别、数据传输，详实、准确地记录水射流或水力压裂增透参数并自动生成数据表及相关曲线。

3　现场工业性试验

井下现场试验在山西焦煤集团屯兰矿 12505 低抽巷、12408 低抽巷和南翼下组煤运输巷进行。屯兰煤矿主采煤层 2、4、8、9 号煤层均为煤与瓦斯突出煤层，具有瓦斯含量大、瓦斯压力高、煤质松软等特点。8 号煤层的瓦斯压力为 0.16～3.84 MPa，煤的瓦斯放散初速度为 12，煤的普氏系数 0.27，煤的破坏类型为Ⅲ类非破坏煤，瓦斯含量为 5.97～10.53 m^3/t，钻孔瓦斯流量衰减系数为 0.425 3 d^{-1}。2 号煤层的瓦斯压力为 0.64～2.79 MPa，煤的瓦斯放散初速度为 15，煤的普氏系数 0.27，煤的破坏类型为Ⅲ～Ⅳ类非破坏煤，为煤与瓦斯突出煤层，煤层瓦斯含量为 9.01～11.8 m^3/t。

3.1　导向槽定向水力压穿钻孔布置

试验地点选在 12505 工作面低抽巷，钻孔布置方式如图 2 所示。预置导向槽钻孔成孔后采用三维旋转水射流预置导向槽，然后下入直径 50 mm 的封孔管，用膨胀水泥封孔 15 m 以上。

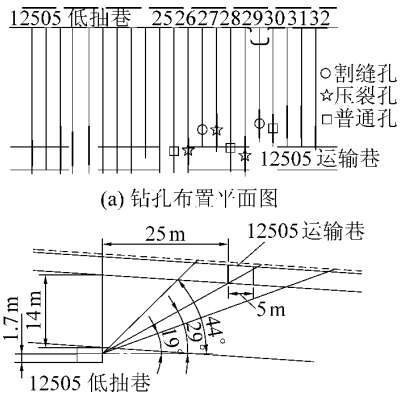
3.2　导向槽定向水力压穿施工工艺

1) 按照设计施工导向槽钻孔和若干控制钻孔。

2) 在导向槽钻孔的煤层段中采用高压水射流预先形成一个或者若干个导向槽。

3) 利用导向槽和控制钻孔控制水力压裂方向，将导向槽钻孔与控制钻孔之间的煤体压穿，通过高压水携带出大量煤屑经控制钻孔排出。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



(a) 钻孔布置平面图

(b) 钻孔布置剖面图

图 2　导向槽定向水力压穿钻孔布置

Fig. 2　Layout of guided groove directional hydraulic penetration boreholes

4) 压裂结束后,导向槽钻孔和控制钻孔封孔接入抽采系统进行联合抽采(图 3)。

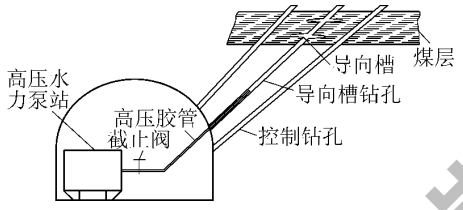


图 3　导向槽定向水力压穿示意

Fig. 3　Schematic of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove

3.3　增透效果分析

在 2014 年 7 月 4 日至 7 月 27 日期间,对 126 号至 131 号钻孔开展导向槽定向水力压穿增透试验。首先对 127 号和 131 号钻孔进行了割缝,分别割出煤量 1.7、1.5 t,经计算割缝后钻孔直径分别为 555、696 mm。封孔后对 130、128、126 号钻孔进行定向水力压穿,开裂压力 1820 MPa,用时 3148 min,127 号至 130 号钻孔沟通出水,试验参数见表 1。

表 1　12505 低抽巷压裂试验参数

Table 1　Experimental parameter of hydraulic fracturing in No. 12505 floor gas drainage roadway

压裂孔号	开裂压力/MPa	压裂用时/min	出水钻孔编号
130	20	48	129、128
128	20	31	129、127、130
126	18	35	127

措施完成后所有钻孔接入抽采系统进行效果考察,并选取 120125 号常规钻孔作为对比,通过抽采负压、瓦斯浓度、瓦斯流量计算抽采瓦斯的纯流量,考察导向槽定向水力压穿的增透效果,如图 4 所示。

从 2014 年 7 月 9 日采取导向槽定向水力压穿作业后,试验钻孔的平均瓦斯抽采体积分数为 34.33%85.83%,平均为 66.39%; 对比钻孔的平均瓦斯抽采体积分数为 20.5%56.0%,平均为 38.0%; 采取增透作业钻孔的平均瓦斯体积分数是对比孔的 1.75 倍。采取导向槽定向水力压穿增透钻孔的瓦斯抽采纯流量是常规钻孔的 3.29 倍和 6.29 倍,平均为 4.79 倍。

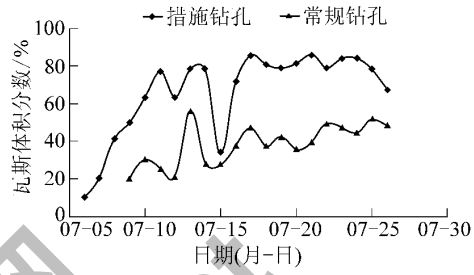


图 4　瓦斯浓度对比

Fig. 4　Gas concentration contrast

3.4　导向槽定向水力压穿增透技术的应用

为解决 12408 轨道巷掘进期间 2 号煤层的煤与瓦斯突出问题,在轨道上山布置 4 个千米钻孔预抽瓦斯。未覆盖巷道通过布置穿层钻孔并实施导向槽定向水力压穿增透措施来强化预抽瓦斯。每 100 m 试验巷道内施工钻孔 33 个(预置导向槽钻孔 22 个,水力压穿钻孔 11 个),钻孔长度 915.23 m,煤孔段长度 210.13 m。增透消突措施从 1 500 m 进尺处至开切眼处,共计 180 m。

通过对比发现,导向槽定向水力压穿钻孔的平均瓦斯抽采体积分数为 39%43%; 单孔瓦斯抽采纯量为 0.011 90.014 0 m^3/min。常规钻孔的平均瓦斯体积分数为 12.26%,单孔瓦斯抽采纯量为 0.004 5 m^3/min。瓦斯浓度提高了 134%,单孔瓦斯抽采纯量为常规钻孔的 2.93 倍,提高了 193%。对预抽区域的煤体采用残存瓦斯含量(直接法)进行措施效果检验 47 次,残存瓦斯含量为 4.727.83 m^3/t,平均为 6.62 m^3/t,预抽区域的残余瓦斯含量均小于 8 m^3/t。同时,效检钻孔作业时未发生喷孔、顶钻及其他突出预兆,确保煤巷顺利掘进。

4　结　　论

1) 合理布置导向槽与控制钻孔位置及压裂顺序能够实现压裂裂缝转向形成网状裂隙。

2) 开发了包括水力压裂泵站、高压旋转接头(耐压 50 MPa)、螺旋助排渣高压水射流钻杆(耐压

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

63 MPa)、三维旋转水射流喷头和喷嘴、高压胶管、封孔管和高压接头等辅助设施的导向槽定向水力压穿防突装备。

3) 工业试验及应用表明: 三维旋转水射流预置导向槽系统能够预置直径 555696 mm 的导向槽,瓦斯抽采体积分数提高 75%,单孔瓦斯抽采量提高了 193%,区域消突措施有效。

参考文献(References) :

[1] 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.
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.

[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] 赵阳升,杨　栋,胡耀青,等,低渗透煤储层煤层气开采有效技术途径的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):455-458
Zhao Yangsheng,Yang Dong,Hu Yaoqing,*et al*.Study on the effective technology way for mining methane in low permeability coal seam [J].Journal of China Coal Society,2001,26(5):455-458.

[4] 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,2010,31(6):735-737.
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.

[5] 霍中刚.二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J].煤炭科学技术,2015,43(2):80-83.
Huo Zhonggang.New technology of carbon dioxide fracture applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement [J].Coal Science and Technology,2015,43(2):80-83.

[6] 李守国.高压空气爆破煤层增透关键技术与装备研发[J].煤炭科学技术,2015,43(2):92-95.
Li Shouguo.Key technology and equipment research and development of improving coal seam permeability by high pressure air blasting [J].Coal Science and Technology,2015,43(2):92-95.

[7] 杨　威,林柏泉,翟　成,等.水力压裂潜在危险及钻爆压抽一体化技术[J].辽宁工程技术大学学报: 自然科学版,2011,30(1):36-38.
Yang Wei,Lin Baiquan,Zhai Cheng,*et al*.Risk of hydraulic fracturing technology and dbfp technology [J].Journal of Liaoning Technical University: Natural Science,2011,30(1):36-38.

[8] 王耀锋,何学秋,王恩元,等.水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2014,39(10):1945-1955.
Wang Yaofeng,He Xueqiu,Wang Enyuan,*et al*.Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams [J].Journal of China Coal Society,2014,39(10):1945-1955.

[9] 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向[J].煤炭科学技术,2015,43(1):45-49.
Yuan Liang,Lin Baiquan,Yang Wei.Research progress and development direction of control with hydraulic technology in China coal mine [J].Coal Science and Technology,2015,43(1):45-49.

[10] 刘育骥,耿新宇,肖辞源.石油工程模糊数学[M].成都: 成都科技大学出版社,1993.

[11] 蒋廷学,贾长贵,王海涛,等.页岩气网络压裂设计方法研究[J].石油钻探技术,2011,33(3):36-40.
Jiang Tingxue,Jia Changgui,Wang Haitao,*et al*.Study on network fracturing design method in shale gas [J]. Petroleum Drilling Techniques,2011,33(3):36-40.

[12] 王耀锋.三维旋转水射流与水力压裂联作增透技术研究[D].徐州: 中国矿业大学,2015.

[13] 王耀锋,李艳增.预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J].煤炭学报,2012,38(8):1326-1330.
Wang Yaofeng,Li Yanzeng.The technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove [J].Journal of China Coal Society,2012,38(8):1326-1330.

[14] 李艳增.三维旋转水射流扩孔增透技术装备及应用[J].煤矿安全,2015,46(11):124-126.
LI Yanzeng.Technology and equipment of three dimensional rotation water-jets enlarging bore to improve coal seam permeability [J].Safety in Coal Mines,2015,46(11):124-126.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net