

低透气性煤层致裂增透技术应用与展望

李守国^{1,2,3}, 姜文忠^{2,3}, 贾宝山¹, 聂荣山^{2,3}

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110016; 3. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要:为了实现煤层气的工业化利用,分析了三维高压旋转水射流扩孔煤层增透技术、定向分段水力压裂增透技术、高压空气爆破致裂煤层技术的增透效果,应用上述煤层致裂增透新技术后,煤层气抽采量明显增加。高压水通过三维旋转钻头对煤体快速切割迅速破坏煤体,实现对影响区域内煤层气的快速释放;特制封孔器将压裂孔分割为数段,增大压裂面积的同时最大限度地利用高压水能,大幅增加了煤层气的逸出通道;经过加压的高压空气可实现对目标钻孔的连续爆破,大幅增加了煤层的煤层气的逸出通道,经济成本低。由于物理破坏增透方式存在着能量损失大、裂纹扩展方向有一定的随机性、预期方向有一定的偏差等问题,提出研发能溶解部分煤基质溶剂结合物理破坏方式以增加煤层的透气性。

关键词:煤层气;低透气性煤层;增透技术;裂隙

中图分类号:TD712;P618

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2017)06-0035-08

Application and prospects on fracturing and permeability improved technology of mine low permeability seam

Li Shouguo^{1,2,3}, Jiang Wenzhong^{2,3}, Jia Baoshan¹, Nie Rongshan^{2,3}

(1. School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Shenyang Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Shenyang 110016, China; 3. State Key Lab of Coal Mine Safety Technology, Shenyang 110016, China)

Abstract: In order to realize an industrialized utilization of the coalbed methane, an analysis was conducted on a permeability improved technology with a 3D high pressure rotary water jet to ream the borehole in the seam, a permeability improved technology with directional section hydraulic fracturing and high pressure air blasting fracturing technology of the seam. After the fracturing and permeability improved technology applied, the coalbed methane drainage volume was obviously increased. With the 3D rotary drilling bit, the high pressure water could rapidly cut the coal mass and could rapidly damage the coal mass and could rapidly release the coalbed methane affected to the region. The special made packer could divide the fractured borehole into several sections, could enlarge the fracturing area with a max utilization of the high pressure water energy and could highly increase the released channels of the coalbed methane. The pressurized high pressure air could realize a continued blasting in a target borehole, could highly increase the coalbed methane released channels in the seam and could have a low economic cost. Due to the physical failure and permeability improved method had a high energy lost, the cracking expansion direction with a certain random and the expectations with certain deviation problem, the research and development was provided on the technology to dissolve the partial coal based solvent combined with the physical failure, so as to improve the permeability of coal seam.

Key words: coalbed methane; low permeability seam; permeability improved technology; cracks

收稿日期: 2017-03-11; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.06.006

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-004); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新基金资助项目(2014QN003)

作者简介: 李守国(1979—), 男, 黑龙江通河人, 副研究员, 博士研究生, 现任煤科集团沈阳研究院有限公司瓦斯安全研究分院瓦斯抽采技术研究所所长。E-mail: lnfsshouguo@163.com

引用格式: 李守国, 姜文忠, 贾宝山, 等. 低透气性煤层致裂增透技术应用与展望[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 35-42.

Li Shouguo, Jiang Wenzhong, Jia Baoshan, et al. Application and prospects on fracturing and permeability improved technology of mine low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 35-42.

0 引言

我国煤层气资源丰富,高瓦斯矿井储存着我国60%以上的煤层气资源^[1-4]。依据勘探资料可知^[5-8],埋深2 000 m内煤层气地质资源量约 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,居世界第3位。2015年,全国煤层气抽采量 $18.0 \times 10^9 \text{ m}^3$,利用量 $8.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。其中,井下煤层气抽采量 $13.6 \times 10^9 \text{ m}^3$,利用量 $4.8 \times 10^9 \text{ m}^3$;地面煤层气产量 $4.4 \times 10^9 \text{ m}^3$,利用量 $3.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。由于我国煤层普遍存在渗透率低、透气性差的特点,大多数煤矿煤层预抽的煤层气量不足抽采煤层气总量的10%,远落后于世界发达国家。国内主要的煤层气产区存在产量低、衰减快的特点,难以形成稳定的、具有经济效益的气流,如何提高低透气性煤层煤层气抽采量是目前国内煤层气开采的难题。

我国煤层形成后又受到强烈的构造破坏作用,煤的构造发育程度高,造成煤层碎裂,破坏了煤的原始储存结构,改变了煤的固体骨架,孔隙裂隙的连通性也受到了影响,导致我国的绝大部分煤层表现为三低特性^[9]。煤储层的非均质性导致我国煤层气开采呈现区域性的特征。南方和北方主要煤矿区煤层的地质条件差异大,生产矿井区域性特点突出,而地质构造、开拓方式、支护方式的差异,以及施工环境及技术条件决定了煤层气的增产不是一种技术能解决所有的问题,开发多种适应于不同区域矿井的煤层煤层气增透技术势在必行。

我国科研工作者先后开展了交叉钻孔、超前钻孔、深孔松动爆破和深孔控制爆破、密集钻孔、大直径钻孔、水力冲孔、水力割缝、加砂致裂预抽等强化抽采煤层气工艺技术^[10-25]的研究。但由于受煤层开采地质条件、经济条件限制,且部分技术由于配套设备外型尺寸、技术指标及对煤矿环境适应能力等方面限制,其工业化、产业化程度不能满足我国煤层气抽采及煤矿安全形势的需求。

煤科集团沈阳研究院有限公司科研人员通过“十一五”和“十二五”期间的科技攻关,开发出多种低渗透煤层增透的新技术,主要包括:三维高压旋转水射流扩孔及割缝技术、定向分段水力压裂增透技术、高压空气爆破致裂增透技术。笔者介绍了低渗透煤层增透技术的最新研究应用情况,分析了新技

术理论、应用效果和存在的问题,并对未来发展趋势进行了展望。

1 煤层致裂增透新技术

经过长期研究,形成的煤层致裂增透新技术主要有水力化煤层增透新技术和高压空气爆破致裂煤层技术。水力化煤层增透新技术主要有三维高压旋转水射流扩孔及割缝技术和定向分段水力压裂增透技术,以高压水为媒体,通过高压水来破坏煤体,在空间上使不能相互连通的裂隙实现连接,形成空间上的裂隙网络,在空间上形成体积较大的卸压区域,使该区域内的裂隙密度、宽度、长度增加,以实现该区域内煤层气的高效抽采,提高煤层气的抽采量。

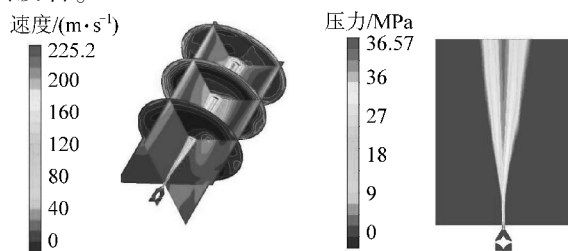
高压空气爆破致裂煤层技术,以高压空气为媒体,通过加压压缩、利用特定装置在爆破部位释放,使高压空气和产生的爆破应力波破坏煤层,实现爆破区域煤层裂隙的扩展及裂隙间的沟通,形成较大的卸压区域,从而增加煤层气的抽采量。

1.1 三维高压旋转水射流扩孔煤层增透技术

三维高压旋转水射流扩孔煤层增透技术通过钻杆轴向旋转带动装有导向叶轮的旋转水射流喷头,形成具有径向、切向、轴向速度的三维旋转水射流,对煤层内预先打好的钻孔进行扩孔,在高压水的作用下使钻孔周围的煤岩体发生破坏,诱导裂隙发育及扩展,形成并扩大钻孔周围的塑性区,实现煤层的卸压与增透,提高煤层气抽采量。

1.1.1 三维高压旋转水射流扩孔煤层增透机理

旋转射流的破岩机理是利用与煤层表面相垂直的正面冲击压力(非淹没条件下射流压力分布如图1所示)产生的拉伸破坏、平行于被冲击煤层表面产生剪切破坏及高压水冲击煤层冲刷破岩。



(a) 射流打击区域

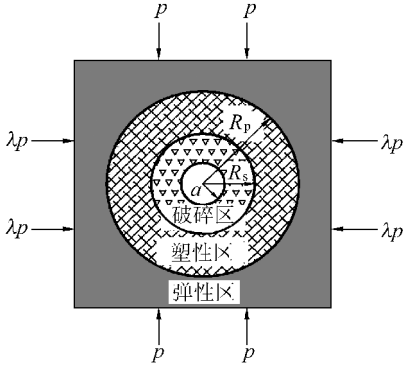
(b) 射流动压力分布

图1 非淹没射流打击区域与动压力分布

Fig. 1 Distribution diagram of non-submersed jet strike zone and dynamic pressure

1.1.2 三维高压旋转水射流扩孔增透力学分析

高压旋转水射流冲击煤层后,射流钻孔周围引起应力集中^[26-29],将目标区域破坏成近圆柱状的孔洞,在孔洞周围形成较大的塑性破坏区。鉴于破坏特征呈空间几何形状,沿孔到远处依次分为原岩应力区、弹性区、塑性区和破碎区,其应力分布符合摩尔-库伦强度准则,分析模型如图2所示。



p —最大水平主应力; λ —侧压系数; λp —最小水平主应力
 a —钻孔半径; R_s —破碎区半径; R_p —弹性区半径

图2 钻孔周围应力分布区域划分

Fig. 2 Zoning of stress distribution around the drill
钻孔周围的应力场,分解为左右受拉、上下受压应力场,如图3所示。

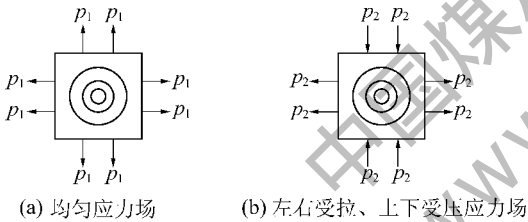


图3 非均匀应力场下钻孔围岩应力分解

Fig. 3 Stress decomposition of drill wall rock under the inhomogeneous stress field

根据图3计算出围压:

$$p_1 = \frac{\lambda+1}{2} p; p_2 = \frac{1-\lambda}{2} p \quad (1)$$

由于弹塑性交界面处的应力为 σ_R , 依据弹性力学理论^[30], 距离钻孔中心为 r 处的钻孔在非均匀应力场下弹性区的围岩应力场为

$$\begin{cases} \sigma_r = -p_1 \left(1 - \frac{R_p^2}{r^2} \right) + \sigma_R \frac{R_p^2}{r^2} - p_2 \left(1 - 4 \frac{R_p^2}{r^2} + 3 \frac{R_p^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta = -p_1 \left(1 + \frac{R_p^2}{r^2} \right) - \sigma_R \frac{R_p^2}{r^2} + p_2 \left(1 + 3 \frac{R_p^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} = p_2 \left(1 + 2 \frac{R_p^2}{r^2} - 3 \frac{R_p^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_r 为径向应力; σ_θ 为切向应力; $\tau_{r\theta}$ 为剪应力; θ 为方位角, ($^\circ$)。

当 $r=R_p$ 时, 即在弹塑性交界面处时, 由式(2)可得:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_R \\ \sigma_\theta = -2p_1 - \sigma_R + 4p_2 \cos 2\theta \end{cases} \quad (3)$$

在钻孔周围形成塑性区后, 塑性区内的应力分布服从 Mohr-Coulomb 破坏准则, 则有:

$$\begin{cases} \sigma_r = (p_i + C \cot \varphi) \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \cot \varphi \\ \sigma_\theta = (p_i + C \cot \varphi) \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \cot \varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中: φ 为内摩擦角, ($^\circ$); C 为黏聚力, MPa; $i=1, 2$ 。

由塑性区相加可以得出:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \frac{2(p_i + C \cot \varphi)}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{r}{a} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 2C \cot \varphi \quad (5)$$

由于所研究的对象是连续体, 所以在弹性和塑性的交界面上, 应力应该是连续的。即在 $r=R_p$ 时, 非均匀应力场下穿层钻孔的煤层段扩孔后塑性区半径的表达式为:

$$R_p = a \left\{ \frac{[(1+\lambda)P + 2(1-\lambda)P \cos 2\theta + 2C \cot \varphi](1 - \sin \varphi)}{2(p_i + C \cot \varphi)} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (6)$$

式中, P 为原岩应力, MPa。

1.1.3 适用条件及应用情况

三维高压旋转水射流扩孔技术的优缺点、适用条件见表1。该技术及配套的装备在潘北矿进行了现场应用, 结果显示: 采用三维高压旋转水射流扩孔及割缝技术对穿层钻孔的煤层段进行扩孔及割缝, 每米煤孔出煤量为 0.33~3.11 t, 平均扩孔直径 831 mm, 扩孔成功率 100%, 作业过程中未发生喷孔现象。

扩孔(及割缝)钻孔煤层气抽采体积分数在 55%~88%, 平均为 80.5%, 平均单孔纯煤层气流量在 9.92~33.4 L/min, 平均为 18.15 L/min; 常规钻孔煤层气抽采体积分数在 25%~76%, 平均为 55.8%, 平均单孔纯煤层气流量在 2.49~17.69 L/min, 平均为 10.54 L/min。把煤层气抽采浓度和抽采纯煤层气流量作为 2 个主要考察指标进行对比, 三维水射流扩孔(及割缝)钻孔的单孔平均煤层气抽采浓度为常规钻孔的

1.43倍,单孔平均纯煤层气流量为常规钻孔的 1.72 倍,提高了 72%,割缝影响范围为 6.3 m。

表 1 三维高压旋转水射流扩孔技术

适用范围	优点	缺点
高煤层气及突出矿区的松软、低透气性煤层的煤层气增产和石门快速揭煤等	高压水压力大,三维旋转钻头射流的切割能力强,影响范围大,单位煤孔的出煤量大,瓦斯抽采效率	巷道围岩比较破损,片帮底鼓比较严重的巷道不适合

1.2 定向分段水力压裂增透技术

定向水力压裂,即在压裂孔周围设置控制孔,利用特制的封孔器将整个压裂钻孔分为数段,每次将压力集中在一点上进行压裂,即将压裂作用“面”改为“点”(图 4),然后按一定的顺序分段实施。由于作用点比较集中,渗失水压降低,有效水压增加,以较小的流量获得较好的压裂效果;压裂孔为四周布置若干辅助压裂孔,辅助压裂孔加以略低的水压力,不仅降低了起裂压力,还起到“导向”作用,引导裂纹向预设方向扩展(图 5)。控制孔还可在压裂后排出积水,并利用其抽采煤层气,实现增透煤体和增加煤层气抽采量的目的。该技术装备主要有高压泵站、加砂装置、封孔器、钻杆(或推杆)、锚固装置等组成,其核心部分为高压泵站、封孔器和注水器。

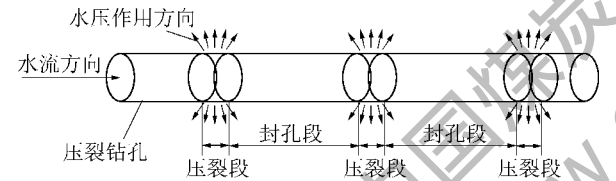


图 4 分段压裂方法
Fig. 4 Fracturing method of subsection

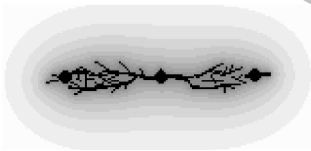
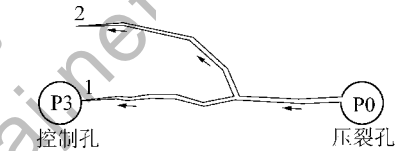


图 5 控制钻孔的“松动圈”对裂纹的导向作用
Fig. 5 “Relaxation zone” of control drill hole inducing the cracks

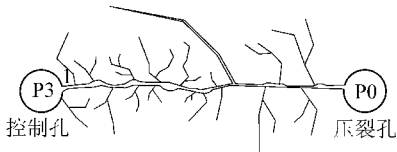
1.2.1 定向分段水力压裂增透技术机理

分段定向压裂增透如图 6 所示,高压水经高压

泵加压后,进入裂隙 1,压力由静压转化为动压将注入水变为具有一定速度的高压水流,邻近的裂隙依次扩张。由于有控制孔的导向作用,裂隙向导向孔的方向扩展,张开的裂隙随着水压的减少,当小于裂隙扩展的临界有效水压,逐渐趋于闭合,停水后由于压裂区后方弹性体的作用,给煤体反作用力,产生大量的次生裂隙。增加了大量的煤层气逸出通道,实现增透煤体和提高煤层气的抽采量。



(a) 定向启裂



(b) 裂隙网络分布
1、2为裂隙编号

图 6 分段定向压裂增透示意

Fig. 6 Schematic diagram for permeability enhancement of segmented directional fracturing

1.2.2 适用条件及应用情况

定向分段水力压裂增透技术适用条件、优缺点见表 2。该技术在淮南矿业集团潘四东矿进行了现场工业性应用。应用结果显示:压裂钻孔与未压裂钻孔相对比,在观察周期内的平均煤层气体积分数提高了 1.72~3.04 倍,平均混合流量提高了 2.00~4.04倍,平均日抽采量提高了 2.94~10.87 倍。

表 2 定向分段水力压裂增透技术

适用范围	优点	缺点
煤层硬度中等;最大主应力为水平应力;厚煤层及倾斜、急倾斜煤层;存在底板巷道的煤层;低透气性煤层的煤层气增产和石门快速揭煤等	高压水的压力大,水能损失较小,利用率高,分段压裂的影响结构面比较大,影响区域较大	不适合软煤及巷道围岩破坏严重的巷道,含有蒙脱石、伊利石的围岩巷道

1.3 高压空气爆破致裂煤层增透技术

高压空气爆破致裂煤层增透技术利用高压空气加压泵站对空气进行加压,通过高压输送管将高压空气输送至爆破释放装置,当压力达到设定的阈值时,远程控制爆破阀释放高压空气,高压空气作用于钻孔周围的煤体,形成高压空气应力波,使煤体发生破碎脱离孔壁,经过多次冲击,煤体内形成相互连通的裂隙网络,区域内煤体空隙增大,实现增加煤层气抽采量的目的。

“高压空气爆破致裂煤层增透技术”装备主要由高压空气加压泵、高压储气罐、高压输送管、高压爆破软管、爆破筒及其他配件组成。

1.3.1 高压空气爆破致裂增透机理

高压空气经爆破释放装置释放,由于煤岩体自身存在缺陷,受到拉、压、剪等应力的混合作用。作用于裂纹端部引起这些弱面部分松裂破坏、原有裂缝扩展延伸造成不连续的破碎,破碎裂隙区内煤的岩体的裂隙贯通。这些相互贯通的裂隙网,在空间上连成一片形成具有区域性的弱面,这些弱面单位面积的裂隙密度剧增,增加了煤层的渗透性,为煤层气扩散提供了良好的逸出通道。

1) 损伤破坏。考虑到节理对煤岩体的损伤影响表现为弹性常数的弱化,煤岩体的弹性常数与损伤^[31]张量之间的关系,可以表示为

$$E=(I-\chi)E_0$$

式中, E_0 、 E 为分别为完整岩块和节理岩体的弹性张量, GPa; I 为单位张量; χ 为节理岩体损伤张量。

考虑到节理对煤岩体的损伤影响表现为弹性常数的弱化^[5],岩石损伤与缺陷的存在,会产生应力放大或集中现象,使破碎区和裂隙区弱应力波作用的强度增大,破坏力增强。

2) 裂纹扩展长度估算。煤岩石介质中抗拉强度远小于抗压强度,依据最大拉应力准则^[32]确定裂纹的扩展长度。最大主应力 σ_1 为

$$\sigma_1=\frac{K_1}{\sqrt{2\pi r_1}}\left(1-\sin\frac{\theta}{2}\right)\cos\frac{\theta}{2}$$

裂纹扩展长度 r_1 为

$$r_1=\omega\frac{l}{2}\left[\frac{\sigma}{(1-D)\sigma_d}\left(1+\sin\frac{\theta}{2}\right)\cos\frac{\theta}{2}\right]^2$$

式中: ω 为影响系数; l 为裂纹半径; σ 为破碎区裂隙应力; D 为煤岩体的损伤变量; σ_d 为围岩的动抗拉强度。

主裂纹到达界面时,主裂隙能够穿越进入下一层而不是沿着界面偏转的条件^[33-34]表达式为

$$\frac{\Gamma_d}{\Gamma_p}>K=f(\alpha,\beta)\left(\frac{\alpha_d}{\alpha_p}\right)^{1-2\lambda}$$

式中: K 为偏转和穿越裂纹的能量释放率之比; Γ_d 为沿界面偏转裂纹的表面能(临界能量释放率); Γ_p 为穿越裂纹的表面能, MJ; α_d 为沿界面偏转的裂纹初始长度, m; α_p 为穿越到下一界面的裂纹初始长度, m; λ_1 为裂纹尖端应力奇异性指数。

3) 粉碎区。高压空气爆破的产生的压力作用时间短,强大的冲击使得该区域煤岩体骨架结构被完全破坏,区域厚度很小,该区域的岩石可以视为各向同性、不可压缩并且没有黏聚力的散体介质。

4) 裂隙区。根据破坏特征将裂隙区划分为塑性破坏区(破裂 I 区)和径向裂缝破坏(破裂 II 区)。破裂 I 区为塑性破坏区,在破裂 I 区产生大量裂隙,裂隙的密度增加,裂隙间的贯通性较好,形成的裂隙网络,消耗应力波的能量较大。许多裂缝彼此贯通导致介质体积的膨胀。II 区的破裂特征是裂隙的密度较 I 区降低,裂隙的发育程度不大相同,裂隙间的贯通明显减少,裂隙的扩展方向及长度受裂隙角度的影响较大,当能量不足以继续扩展时,更容易发生偏转。该区域丧失了环向承载力,但是径向仍可以把破裂 I 区传来的压力传递到弹性区区域。

1.3.2 适用条件及应用情况

在淮南丁集矿西一区 13-1 轨道大巷、西一采区行人通道进行了高压空气爆破致裂煤层增透技术(表 3)应用。应用结果显示:对比未爆破的常规钻孔,高压空气爆破后钻孔自然煤层气涌出量大幅度增加,平均增加 700%;单孔煤层气抽采纯量大幅增加,平均增加 600%。高压空气爆破煤层透气性系数从 0.021 4 m²/(MPa²·d) 提高到 1.138 5~27.065 3 m²/(MPa²·d),提高 50 倍以上,爆破影响范围为 5 m。

表 3 高压空气爆破致裂煤层增透技术

Table 3 Technology of permeability increased by cracking with high-pressure air blasting

适用范围	优点	缺点
透气性较低、煤层气含量高的中硬煤层,或者煤层含有伊利石、蒙脱石等遇水膨胀性较大的煤层,也适用于巷道围岩支护困难、爆破环境恶劣、消突及石门揭煤等	爆破压力大、不污染环境、环境的适应性强、经济性好、可靠性高	不适合软煤层

2 煤层增透技术研究展望

通过对煤体和煤层气基础研究加大投入,不断有新的技术和装备被研发出来。目前,国内所有的技术和装备,主要是依靠来自机械设备的外力来破坏煤体结构,即通过人造裂隙或者扩展原有的天然裂隙实现天然裂隙间的彼此沟通,实现单位体积的裂隙密度增大,增加煤体的渗透性,在一定程度上解决了抽采问题。但由于裂纹扩展的方向具有一定的随机性,和预期的方向存在一定的偏差,不仅会损失能量,有时会影响该区域巷道支护的稳定性。随着开采深度的增加,深部开采面临的高温、高地应力、高煤层气压力更为复杂的地质情况。由物理破坏引起的煤体裂纹扩张或者沟通的方法,将会对安全生产形成考验。

未来的增透技术及设备应向智能化、无人化、环保的方向发展,实现增透煤体方式多样化。尽管由机械设备通过物理破坏方式增透煤体来提高目标区域的透气性是有效的,但是裂纹扩展的方向有一定的随机性,裂纹扩展的方向和目标也有一定的偏差,会影响煤层气的抽采效果,所以可研制能溶解部分煤基质的溶剂,以增加煤层孔隙和裂隙,结合其他物理破坏的方法提高煤层的透气性,从而增加煤层气的抽采量。

提出基于溶剂增透与物理增透的复合式增透方式,在目标增透区域内依据爆破范围,设计溶剂注入孔和物理增透的钻孔数量、间距及空间结构,溶剂注入孔深度要大于物理增透钻孔深度,以便于增大溶剂的渗透范围,形成若干个结构弱面,在物理增透的作用力下,使得裂缝沿弱面方向扩展,增加裂隙的空间体积,使目标区域的煤裂隙和孔隙内的煤层气得到有效释放,其工艺流程如图7所示。

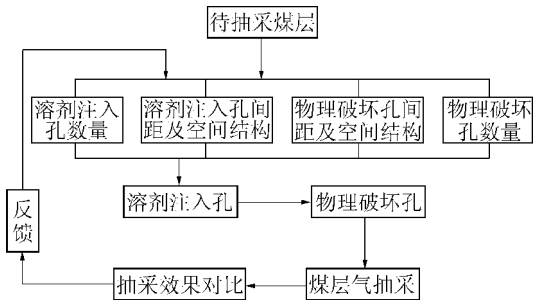


图7 溶剂增透与物理增透的复合式增透工艺

Fig.7 Flow chart of solvent and physical permeability increase

3 结 论

1)通过分析在外力作用下,煤层渗透率的变化规律,得到增透的最佳效果阶段,以及增加煤层渗透性的主要内容,包括裂隙的数量、裂隙的宽度及裂隙间的沟通。

2)介绍了低透气性煤层新增透技术工艺、增透机理及现场应用效果,指出了各技术的适用范围。

3)提出了增透新技术未来的发展趋势。新技术的应用在一定程度上解决了低渗透煤层的煤层气抽采难题,但是在智能化和无人化方向有待提高,相比之前的技术,新技术的抽采效率大幅提高,但是存在能量利用率低的问题,一定程度上会影响技术的推广和应用。因此,提出研制能溶解部分煤基质的溶剂以实现增加孔隙和裂隙来增加煤层透气性。

参考文献(References):

[1] 李建忠,郑民,张国生,等.中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J].石油学报,2012,33(1):89-98.
Li Jianzhong, Zheng Min, Zhang Guosheng, et al. Potential and prospects of conventional and unconventional natural gas resource in China[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(1):89-98.

[2] 妥进才,王先彬,周世新,等.深层油气勘探现状与研究进展[J].天然气地球科学,1999,10(6):1-8.
Tuo Jincai, Wang Xianbin, Zhou Shixin, et al. Present exploration situation and research progress of deep buried petroleum[J].Natural Gas Geoscience,1999,10(6):1-8.

[3] 廖永远,罗东坤,李婉棣.中国煤层气开发战略[J].石油学报,2012,33(6):1098-1102.
Liao Yongyuan, Luo Dongkun, Li Wandi. Development strategy analysis of China's CBM[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(6):1098-1102.

[4] 戴金星,黄士鹏,刘岩,等.中国天然气勘探开发60年的重大进展[J].石油与天然气地质,2010,31(6):689-698.
Dai Jinxing, Huang Shipeng, Liu Yan, et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years[J].Oil & Gas Geology,2010,31(6):689-698.

[5] 王庭斌.中国大中型气田分布的地质特征及主控因素[J].石油勘探与开发,2005,32(4):1-8.
Wang Tingbin. Distribution of large-middle sized gas fields in China: Geological characteristic and key controlling factors[J].Petroleum Exploration and Development, 2005,32(4):1-8.

[6] 朱庆忠,左银卿,杨延辉.如何破解我国煤层气开发的技术难题:以沁水盆地南部煤层气藏为例[J].天然气工业,2015,35(2):106-109.
Zhu Qingzhong, Zuo Yinqing, Yang Yanhui. How to solve the technical problems in the CBM development: a case study of a

- CMB gas reservoir in the southern Qinshui Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(2): 106-109.
- [7] 车长波, 杨虎林, 李富兵, 等. 我国煤层气资源勘探开发前景[J]. *中国矿业*, 2008, 17(5): 1-4.
- Che Changbo, Yang Hulin, Li Fubing, *et al.* Exploration and development prospects of coalbed methane (CBM) resources in China [J]. *China Mining Magazine*, 2008, 17(5): 1-4.
- [8] 穆福元, 孙粉锦, 王一兵, 等. 沁水盆地煤层气田试采动态特征与开发技术对策[J]. *天然气工业*, 2009, 29(9): 117-119.
- Mu Fuyuan, Sun Fenjin, Wang Yibing, *et al.* Characteristics of pre-production performance and technical countermeasures in the coalbed methane gas field of Qinshui Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(9): 117-119.
- [9] 田俊斌. 低渗透煤岩体水力压裂裂隙扩展演化及其增透机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [10] 王继仁, 马恒, 贾进章. 孔网瓦斯抽放技术的研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(4): 380-383.
- Wang Jiren, Ma Heng, Jia Jinzhang. Study on the gas drainage technique of borehole-net [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(4): 380-383.
- [11] 高坤. 高能气体冲击煤体增透技术实验研究及应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [12] 邹忠有, 白铁刚, 姜文忠, 等. 水力冲割煤层卸压抽放瓦斯技术的研究[J]. *煤矿安全*, 2000, 31(1): 34-36.
- Zou Zhongyou, Bai Tiegang, Jiang Wenzhong, *et al.* Research into coal-bed methane drainage by pressure relief hydraulic impacting cutting technology [J]. *Safety in Coal Mines*, 2000, 31(1): 34-36.
- [13] 赵岚, 冯增朝, 杨栋, 等. 水力割煤提高低渗透煤层渗透性实验研究[J]. *太原理工大学学报*, 2001, 32(2): 109-111.
- Zhao Lan, Feng Zengchao, Yang Dong, *et al.* Testing Study of Improving Seepage flow Laws of Low seepage Coalbed by Hydraulic-cutting Seams [J]. *Journal of Taiyuan University Technology*, 2001, 32(2): 109-111.
- [14] 段康廉, 冯增朝, 赵阳升, 等. 低渗透煤层钻孔与水力割煤瓦斯排放的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(1): 50-53.
- Duan Kanglian, Feng Zengchao, Zhao Yangsheng, *et al.* Testing study of methane drainage by bore and hydraulic-cutting seam from low permeability coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(1): 50-53.
- [15] 唐建新, 贾剑青, 胡国忠. 钻孔中煤体割缝的高压水射流装置设计及试验[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1501-1504.
- Tang Jianxin, Jia Jianqing, Hu Guozhong. Design and experimentation of high-pressure water jet set applied to incising coal seam in boreholes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1501-1504.
- [16] 李晓红, 卢义玉, 赵瑜. 高压脉冲射流提高松软煤层透气性的研究[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(12): 1386-1390.
- Li Xiaohong, Lu Yiyu, Zhao Yu. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed waterjet [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1386-1390.
- [17] 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 Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(12): 1996-2001.
- [18] 赵振保. 变频脉冲式煤层注水技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2008, 25(4): 486-489.
- Zhao Zhenbao. Study of technology of variable-frequency pulse water infusion into coal seam [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(4): 486-489.
- [19] 章毅, 杨胜强. 脉动水力压裂技术应用于煤层注水综述[J]. *中国科技论文在线*, 2010, 5(11): 902-906.
- Zhang Yi, Yang Shengqiang. Review on application of pulse hydraulic fracturing technology in coal seam water injection [J]. *Science Paper Online*, 2010, 5(11): 902-906.
- [20] 赵兴君, 岳丰田. 交叉钻孔抽放瓦斯垂直距离的确定[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2000, 19(1): 5-7.
- Zhao Xingjun, Yue Fengtian. Definition of vertical gas suction in cross drill hole [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Nature Science*, 2000, 19(1): 5-7.
- [21] 李学臣, 魏国营. 突出煤层水力掏槽防突技术措施的应用[J]. *河南理工大学学报*, 2006, 25(4): 270-274.
- Li Xuechen, Wei Guoying. Application of outburst prevention technique measure by using hydraulic cutting in outburst coal bed [J]. *Journal of Henan Polytechnic University*, 2006, 25(4): 270-274.
- [22] 陈士海. 深孔水压爆破装药结构与应用研究[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(S1): 112-116.
- Chen Shihai. Study on charging structure and its use of deep-hole water pressure blasting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(S1): 112-116.
- [23] 张英华, 倪文, 尹根成, 等. 穿层孔水压爆破法提高煤层透气性的研究[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(3): 298-302.
- Zhang Yinghua, Ni Wen, Yin Gencheng, *et al.* Study on improving the penetrability of coal seam with the water pressure blasting in the through beds hole [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(3): 298-302.
- [24] 尹根成, 张英华. 水压爆破造缝提高煤层瓦斯抽放率技术[J]. *煤炭工程*, 2006(12): 73-74.
- Yin Gencheng, Zhang Yinghua. Technology of increase coal seam gas drainage rate with water pressure blasting seam [J]. *Coal Engineering*, 2006(12): 73-74.
- [25] 穆朝民, 王海露, 黄文尧, 等. 高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制[J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2496-2500.
- Mu Chaomin, Wang Hailu, Huang Wenyao, *et al.* Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2496-2500.
- [26] 王素玲, 姜民政, 刘合. 基于损伤力学的三轴水力压裂三维裂缝形态研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 2205-2210.
- Wang Suling, Jiang Minzheng, Liu He. Study of hydraulic fractu-

- ring morphology based on damage mechanics analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 2205–2210.
- [27] 王瑞和, 周卫东, 沈忠厚, 等. 旋转射流破岩钻孔机理研究[J]. *中国安全科学学报*, 1999, 9(S1): 1–5.
- Wang Ruihe, Zhou Weidong, Shen Zhonghou, *et al.* Study on mechanism of rock-breaking by swirling water[J]. *China Safety Science Journal*, 1999, 9(S1): 1–5.
- [28] 王瑞和, 倪红坚. 高压水射流破岩机理研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2002, 26(4): 118–122.
- Wang Ruihe, Ni Hongjian. Research of rock fragmentation mechanism with high-pressure water jet[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2002, 26(4): 118–122.
- [29] 王耀锋. 三维旋转水射流扩孔与压裂增透技术工艺参数研究[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(7): 4–7.
- Wang Yaofeng. Process parameters study on reaming and fracturing antireflection technology of three dimensional rotational water jetting[J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(7): 4–7.
- [30] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [31] 徐幼平, 林柏泉, 翟成, 等. 定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(7): 104–110.
- Xu Youping, Lin Baiquan, Zhai Cheng, *et al.* Analysis on dynamic characteristics of cracks extension in directional hydraulic fracturing and its application[J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(7): 104–110.
- [32] 姜光杰, 孙明闯, 付江伟. 煤矿井下定向压裂增透消突成套技术研究及应用[J]. *中国煤炭*, 2009, 35(11): 10–14.
- Jiang Guangjie, Sun Mingchuan, Fu Jiangwei. Research and application of complete set of technology for directional fracturing to increase coal seam permeability and eliminate coal/gas outbursts in underground coal mines[J]. *China Coal*, 2009, 35(11): 10–14.
- [33] 孙洋, 王彪, 王巧云, 等. 涂层式裂纹监测系统中基体裂纹穿越行为研究[J]. *力学学报*, 2015, 47(5): 772–777.
- Sun Yang, Wang Biao, Wang Qiaoyun, *et al.* Study of the substrate crack penetration mechanisms in crack-detected coating system[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(5): 772–777.
- [34] He M Y, Evans A G, Hutchinson J W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic material: role of residual stresses. *International Journal of Solids and Structure*, 1994, 31(24): 3443–3455.
- exploitation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 966–975.
- [19] Georgee. Andreev. Brittle Failure of Rock Materials Test Results and Constitutive Models[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 1–5.
- [20] 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析(RFPA^{2D})系统的细观单元本构关系及验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1): 24–29.
- Zhu Wancheng, Tang Chun'an, Yang Tianhong, *et al.* Constitutive relationship of mesoscopic elements used in RFPA^{2D} and its validations[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1): 24–29.
- [21] 马衍坤, 刘泽功, 周健, 等. 基于孔壁应变发展规律的压裂孔三阶段起裂特征试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(8): 2151–2158.
- Ma Yankun, Liu Zegong, Zhou Jian, *et al.* Study of tri-stage fracturing characteristic of borehole based on strain of hole-wall in hydraulic fracturing process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(8): 2151–2158.
- [22] 王鸿勋. 水力压裂原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.
- impact on gas diffusion characteristic of coal[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 443–448.
- [16] 郭红玉, 苏现波. 煤层注水抑制瓦斯涌出机制研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(6): 928–931.
- Guo Hongyu, Su Xianbo. Research on the mechanism of gas emission inhibition in water-flooding coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(6): 928–931.
- [17] 赵东, 冯增朝, 赵阳升. 高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(3): 547–555.
- Zhao Dong, Feng Zengzhao, Zhao Yangsheng. Experimental study of effects of high pressure water injection on desorption characteristic of coal-bed methane[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(3): 547–555.
- [18] 刘东, 许江, 尹光志, 等. 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 966–975.
- Liu Dong, Xu Jiang, Yin Guangzhi, *et al.* Development and application of multifield coupling testing system for coal-bed methane

(上接第16页)