

围岩—煤储层缝网改造增透抽采瓦斯理论与技术

马 耕¹ 苏现波² 蔺海晓² 郭红玉² 陶云奇¹ 刘 晓²

1.河南煤业化工集团有限责任公司 2.河南理工大学能源科学与技术学院

马耕等.围岩—煤储层缝网改造增透抽采瓦斯理论与技术.天然气工业,2014,34(8):53-60.

摘 要 现行的储层改造工艺仅适用于硬煤,对软煤则无能为力,这是造成我国煤层气产业化难以取得突破的主因这一,探索一种实现各类储层强化增透的普适性技术是当务之急。为此,采用理论分析与现场试验相结合的方法,系统分析了水力压裂过程中径向引张、周缘引张和剪切裂缝等多级、多类裂缝形成的力学机制,揭示了围岩—煤储层缝网改造的增透机理。结果表明:水平井分段多簇射孔压裂、水力喷射分段压裂、四变压裂以及一些辅助措施是实现缝网改造的有效技术途径,尤其是四变压裂使得煤层气垂直井和丛式井的缝网改造成为现实。结论认为:围岩抽采层缝网改造技术以钻井施工安全、可改造性强、抗应力敏感和速敏能力强、适合于任何煤体结构煤储层为特点,因而具有显著的优势;该技术除了在围岩水敏性极强、富水性强的条件下使用尚有局限外,具有广泛的适应性。煤层气地面开采和煤矿井下抽采成功的工业性试验表明,所构建的围岩—煤储层缝网改造理论和技术体系,将作为一种广普性的增透措施在我国煤层气井地联合抽采领域发挥作用。

关键词 煤层瓦斯 顶底板 围岩抽采层 缝网改造 增透机理 四变压裂 技术

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.08.008

A theory and technical system of permeability enhancement to extract coal gas by fracture network stimulating in adjacent rocks and coal reservoirs

Ma Geng¹, Su Xianbo², Lin Haixiao², Guo Hongyu², Tao Yunqi¹, Liu Xiao²

(1.Henan Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450046, China; 2.School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 8, pp.53-60, 8/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The existing reservoir stimulating technology is only applicable to hard coal but unsuitable for soft coal, which restricts the CBM industrialization in China. It is urgent to develop a universal stimulating technology which can increase the permeability in various coal reservoirs. Theoretical analysis and field tests were used to systematically analyze the mechanical mechanism of the formation of radial tensile fractures, peripheral tensile fractures, shear fractures and other multistage various fractures in hydraulic fracturing and to work out the mechanism of permeability enhancement by fracture network stimulating in adjacent rocks and coal reservoirs. It is shown that multiple perforation staged fracturing of horizontal wells, hydraulic-jet staged fracturing, quadruplex hydraulic fracturing and some auxiliary measures are effective technical approaches to achieving fracture network stimulating, especially quadruplex hydraulic fracturing that can stimulate the fracture network in vertical and cluster wells. The fracture network stimulating technology for adjacent rock mining layers has significant advantages, such as safe drilling operation, strong renovation, strong anti-stress sensitivity, and strong velocity sensitivity, so this technology is suitable for coal reservoirs with any coal structures. In addition to adjacent rocks with strong water sensitivity and a high water yield, the technology is also strong in adaptability. Thus, a successful industrial test conducted on ground and under coal mines proves that the theory and technical system of fracture network stimulating in adjacent rocks and coal reservoirs will play a role as a widely applicable measure in the CBM development in China.

Keywords: CBM, adjacent rock mining layer, fracture network stimulating, permeability enhancement mechanism, quadruplex hydraulic fracturing, technology

基金项目:国家自然科学基金资助项目“煤层生物甲烷的形成机理研究”(编号:41002047、40972109)。

作者简介:马耕,1958年生,教授级高级工程师,博士研究生;现从事煤层气开发及管理工作。地址:(450046)河南省郑州市郑东新区商务外环路6号。E-mail:mageng1958@163.com

通信作者:苏现波,1963年生,教授,博士生导师。地址:(454000)河南省焦作市高新区世纪路2001号。电话:(0391)3987981。E-mail:1054608403@qq.com

地面煤层气开发以其资源、减灾与减排三重意义而备受重视,美国的 13 个煤盆地中有 11 个已实现了煤层气商业化开发^[1];加拿大阿尔伯特地区近期煤层气产量上升迅猛^[2];澳大利亚在苏拉特盆地多分支水平井的开发效益显著^[3-4]。我国在经历了 30 多年的艰苦探索后,在局部地区实现了煤层气商业化运作。

煤层气开发的核心技术是水力压裂。由于水力压裂的适用对象是弹性体,在弹性介质中形成支撑裂缝,增加其导流能力,达到增产的目的;而对于隶属于塑性体的软煤则无能为力,这已被大量的实践和研究所证实^[5],构成了煤层气开发的第一个禁区,而我国半数以上的煤层气资源赋存在软煤相对发育的储层内。现行的活性水+石英砂压裂工艺,难以在深部高应力煤储层中造出长且宽的支撑裂缝,排采过程中逐渐加强的应力敏感效应使得支撑剂严重破碎、镶嵌、裂缝闭合,在经历短暂的产气后成为死井^[6],从而构成了煤层气开发的第二个禁区。正是由于这两大禁区的存在,致使我国煤层气大规模商业化开发难以取得突破。

煤矿井下瓦斯抽采可区分为未卸压和卸压抽采两大类^[7]。前者的抽采效果完全取决于煤储层的原始渗透率,往往以增加钻孔工程量来弥补;后者则可以将渗透率提高千倍以上。保护层开采是最有效的增透手段,在多煤层矿井得到了成功应用^[8-9]。保护层开采后,不仅使得被保护煤层渗透性显著提升,而且可以从围岩裂隙带中抽出大量瓦斯。说明只要在围岩中形成一个裂隙发育的卸压带,即可实现煤层瓦斯的大规模、快速抽采。回采工作面高位钻孔、高抽巷抽采与此原理相同。基于这一原理,苏现波^[10-12]、马耕^[13]提出了“虚拟储层”强化抽采瓦斯技术,即通过水力压裂将煤层的顶底板改造成瓦斯运移产出的高速通道,相当于改造出保护层开采中的裂隙带。这样就避开了不可强化的软煤,且岩层的应力敏感性远低于煤层。该技术为此禁区的突破提供了一种行之有效的新途径,近期的工业性试验充分证实了此工艺的可行性。

近些年来,随着页岩气储层体积改造技术的日臻成熟^[14-15],使得煤储层缝网改造理论与技术得以长足进步。笔者从力学的角度深入分析压裂过程中多级、多类裂缝的形成机制,据此提出实现围岩—煤储层缝网改造的技术途径,为瓦斯的井地联合高效抽采提供一种全新的工艺。

1 围岩—煤储层缝网改造理论

1.1 围岩抽采层概念

围岩抽采层是指邻近煤层的顶底板岩层,该岩层

可通过人工改造形成多级、多类裂缝网络与煤层沟通、成为瓦斯运移产出的产层,早期被称为“虚拟储层”^[10-13]。围岩抽采层经水力强化改造后形成的裂缝网络与煤层沟通的范围远远大于本煤层钻孔,瓦斯由煤层解吸、扩散、渗流到这一产层后被快速抽出;相当于在围岩中建立了一条瓦斯运移的高速通道。围岩抽采层缝网改造技术突破了软煤储层无法直接进行水力强化、实现商业化开发的禁区;同时也以其远远低于煤储层应力敏感而使深部高应力储层煤层气井达到产能成为可能。

1.2 围岩抽采层缝网改造增透机理

缝网改造技术是指在水力压裂过程中,采用分段多簇射孔压裂、水力喷射分段压裂和四变压裂(变排量、变支撑剂、变压裂液和变砂比),以及一些辅助措施(端部脱砂、投球暂堵等技术),最大限度地扰动原始地应力场,从而使裂缝的起裂与扩展不简单是储层的张性破坏,还存在剪切、滑移、错断等复杂的力学行为,进而形成径向引张、周缘引张和剪切裂缝等多类、多级裂缝体系。同时压裂过程中储层自身形成的脆性颗粒可起到自我支撑作用,壁面位移也可实现裂缝增容。这样就在储层内形成了一个由天然裂缝与人工改造的多级、多类裂缝相互交错的裂缝网络体系,整体上改变了储层三维空间渗透性,而不单单是几条裂缝的导流能力。从而造成裂缝壁面与储层基质块的接触面积最大化,使得流体从任意方向的基质向裂缝的渗流距离最短,为储层流体运移产出提供了最佳、最畅通道。这种以多级、多类裂缝的形成为目的的储层强化技术称缝网改造技术(图 1)。缝网改造就是要解决裂缝能否形成与如何形成的问题。

1.2.1 径向引张裂缝

在水力压裂过程中,当流体压力超过最小水平应力与岩石抗拉强度时,薄弱面将被拉裂。假设裂缝内流体压力各方向相等,裂缝端部的应力强度因子^[16]为:

$$K_I = \frac{10}{\sqrt{\pi a GSI}} \int_{-a}^a p(y) \sqrt{\frac{a+y}{a-y}} dy \quad (1)$$

式中 K_I 为煤岩体张性裂缝强度因子; $p(y)$ 为作用于裂缝面上的净压力; a 为裂缝的半长; y 为裂缝上任一点到井筒中心的距离; GSI 为煤岩体地质强度指标,反映非完整煤岩体结构与力学特性的一个定量指标^[17-18],不同 GSI 值的煤岩体应该具有不同的应力强度因子。

当 $K_I > K_{Ic}$ (K_{Ic} 为煤岩体的张性裂缝断裂韧度)时,裂缝开始向前扩展,且沿着最大主应力方向延

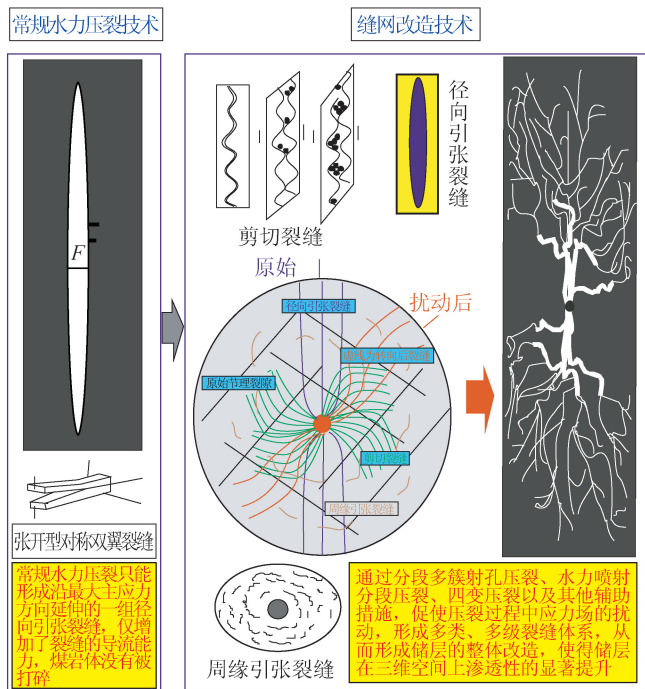


图 1 缝网改造技术原理图

伸、最小主应力方向张开，任何压裂方式均可形成此类裂缝(图 2)。

1.2.2 剪切裂缝

假定在储层中存在长度为 b 的微裂缝，则剪切应力强度因子^[19]为(图 2)：

$$K_{II} = \frac{10\tau\sqrt{\pi b}}{\sqrt{GSI}} = \frac{5\sin\alpha\sqrt{\pi b}(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{\sqrt{GSI}} \quad (2)$$

式中 K_{II} 为剪性裂缝强度因子； σ'_1 、 σ'_3 为最大和最小

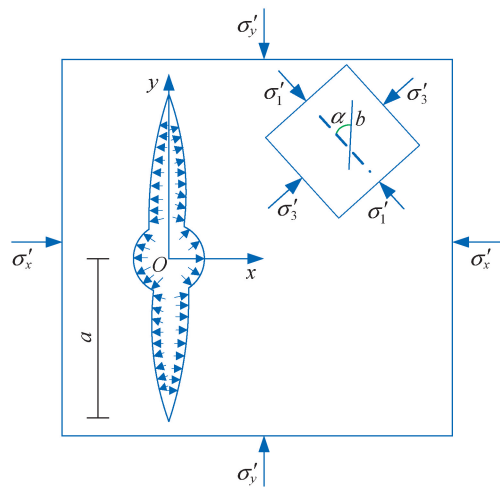


图 2 径向引张与剪切裂缝形成机制图

有效应力； α 为裂缝与主应力 σ'_3 的夹角； b 为微裂缝长度； τ 为裂缝面上切应力。

当 $K_{II} > K_{IIc}$ (K_{IIc} 为煤岩体的剪性裂缝断裂韧度)时，剪切裂缝将向前扩展，任何压裂方式理论上均可形成此类裂缝。

1.2.3 周缘引张裂缝

在水力压裂过程中快速降低排量、甚至停泵，或瞬时卸载放喷，都可形成近乎垂直于径向裂缝的周缘引张裂缝。这些压裂方式可造成井筒内快速卸压，流体带动煤岩体向井筒方向径向位移，位移量自钻孔壁面向外逐渐减小。由于煤岩体中结构弱面两侧位移量不同，将产生拉应力，当拉应力超过岩体抗拉强度时，裂缝开始萌生扩展，形成周缘引张裂缝^[20-21](图 3)。

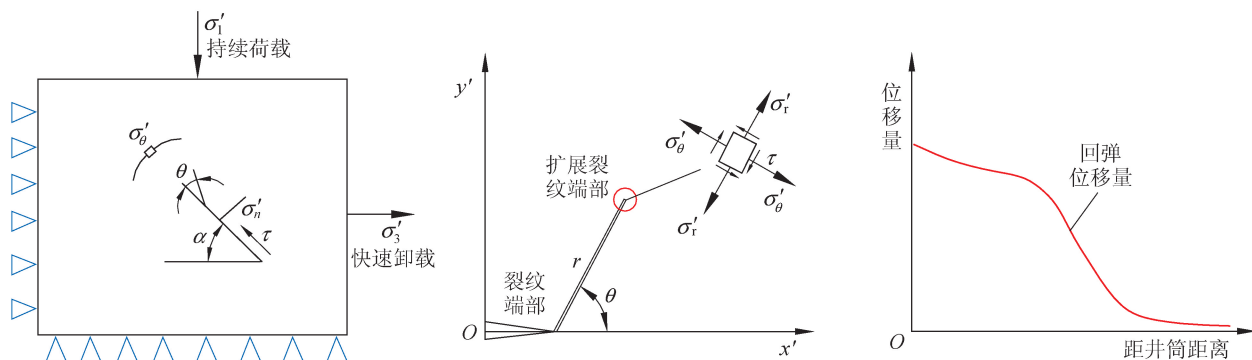


图 3 周缘引张裂缝形成机制图

裂缝面的法向有效应力和剪应力可表示为：

$$\begin{cases} \sigma'_n = \frac{1}{2}[(\sigma'_1 + \sigma'_3) + (\sigma'_1 - \sigma'_3)\cos 2\alpha] \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)\sin 2\alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中 α 为裂缝与最小有效应力方向的夹角； τ 为剪切应力； σ'_n 为裂缝面法向有效应力。

当 $\sigma'_n < 0$ 时，裂缝面法向应力为拉应力状态，产生法向位移、裂开，滑动抗剪摩擦力忽略不计，裂缝端

部扩展裂纹(r, θ)处的 σ'_θ 可表示为:

$$\sigma'_\theta = \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sigma'_n \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3\tau}{2} \sin \theta \right) \quad (4)$$

式中 θ 为裂缝转向角; r 为扩展裂纹长度。

对于长度较小的裂纹, 可看做是无限体平面问题, 在无限远处有一对压拉组合作用力, 则张性裂纹端部的应力强度因子为:

$$K_I = \frac{10}{\sqrt{GSI}} \lim_{r \rightarrow 0} [\sigma'_\theta (2\pi r)^{\frac{1}{2}}] \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得出扩展裂纹(r, θ)处的应力强度因子为:

$$K_I = \frac{10\sqrt{\pi a}}{\sqrt{GSI}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sigma'_n \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} \tau \sin \theta \right) \quad (6)$$

对式(4)求偏导, 并令其为0, 则

$$2\tau \tan^2 \frac{\theta_0}{2} - \sigma'_n \tan \frac{\theta_0}{2} - \tau = 0 \quad (7)$$

式中 θ_0 为转向裂缝开裂角。

将式(7)确定的开裂角(θ_0)代入式(6), 求出拉剪作用下的裂纹起裂应力强度因子为:

$$K_I = \frac{10\sqrt{\pi a}}{\sqrt{GSI}} \cos \frac{\theta_0}{2} \left(\sigma'_n \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} \tau \sin \theta_0 \right) \geq K_{Ic} \quad (8)$$

周缘引张裂缝是单纯的注入式压裂难以实现的, 而变排量、吞吐或重复压裂的卸载阶段可形成。

1.2.4 裂缝转向与多级裂缝的形成

变排量压裂、分段多簇射孔压裂、重复压裂等都会引起地应力重新分布, 后期压裂裂缝将与前期压裂所形成的裂缝呈 θ 的方位延伸, 从而形成转向裂缝^[22-23]。压裂形成的每条裂缝都将产生诱导应力场, 造成应力重新分布^[24], 裂缝在 A 点形成的诱导应力见图 4 和式(9)~(12)。

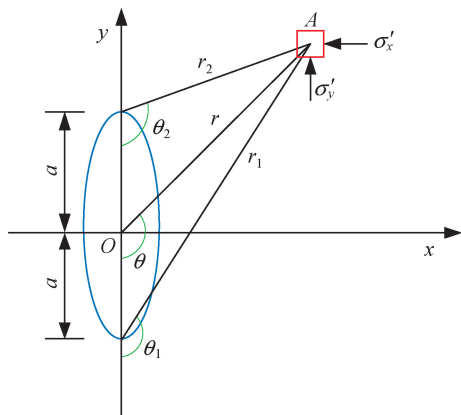


图4 裂缝诱导应力场图

$$\sigma'_{x诱导} = p \frac{r}{a} \left(\frac{a^2}{r_1 r_2} \right)^{\frac{3}{2}} \sin \theta \sin \frac{3}{2} (\theta_1 + \theta_2) + p \left[\frac{r}{(r_1 r_2)^{\frac{1}{2}}} \cos \left(\theta - \frac{1}{2} \theta_1 - \frac{1}{2} \theta_2 \right) - 1 \right] \quad (9)$$

$$\sigma'_{y诱导} = -p \frac{r}{a} \left(\frac{a^2}{r_1 r_2} \right)^{\frac{3}{2}} \sin \theta \sin \frac{3}{2} (\theta_1 + \theta_2) + p \left[\frac{r}{(r_1 r_2)^{\frac{1}{2}}} \cos \left(\theta - \frac{1}{2} \theta_1 - \frac{1}{2} \theta_2 \right) - 1 \right] \quad (10)$$

$$\sigma'_z诱导 = \nu (\sigma'_{x诱导} + \sigma'_{y诱导}) \quad (11)$$

$$\tau_{xy诱导} = p \frac{r}{a} \left(\frac{a^2}{r_1 r_2} \right)^{\frac{3}{2}} \sin \theta \cos \frac{3}{2} (\theta_1 + \theta_2) \quad (12)$$

式中 $\sigma'_{x诱导}$ 为 x 方向诱导有效应力; $\sigma'_{y诱导}$ 为 y 方向诱导有效应力; p 为缝内流体压力; r 为 A 点到坐标原点的距离; r_1, r_2 分别为 A 点到裂缝两个端点的距离; θ_1, θ_2 分别为 A 点和裂缝两个端点连线与 y 轴的夹角; ν 为泊松比。

以诱导应力与裂缝中的净压力 p 的比值为纵坐标, 以与初始裂缝的距离 x 和半缝高 a 的比值为横轴作图(图 5), 由图 5 可以看出诱导应力的大小随着与初始裂缝距离的变化而改变, 在 3 倍的半缝高距离以后, 诱导应力变的得很小, 可以忽略不计^[25]。

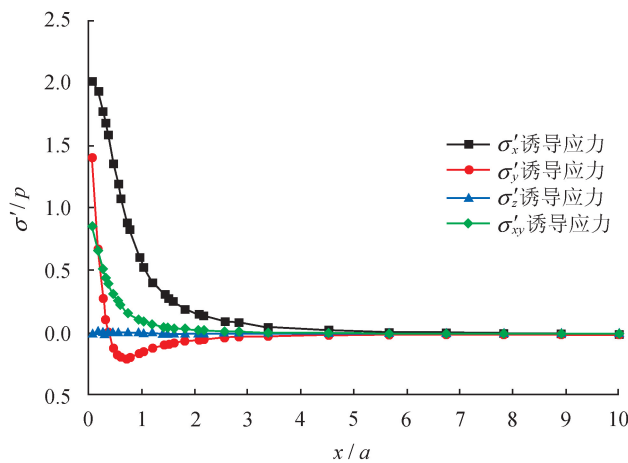


图5 诱导应力变化曲线图

诱导应力场和原应力场相互叠加形成复合应力场。裂缝的复杂性决定了诱导应力场的非均一性, 从而造成了复合应力场的复杂性。正是存在非均一性, 才使多级、多类裂缝的形成成为可能。因此, 缝网改造的核心是通过改变压裂工艺, 最大限度地扰动原始应力场。

1.2.5 裂缝的自我支撑

围岩抽采层压裂过程中形成的剪切裂缝将产生自我支撑(图 1)。随压裂的进行, 剪切裂缝将发生壁面

位移,粗糙的裂缝面凹凸相对,从而发生增容;压裂中形成的一些较大的脆性颗粒,滞留在裂缝体系内,起到了颗粒支撑作用。

上述力学分析表明,储层缝网改造的核心是最大限度地扰动原始应力场,只要通过水力压裂不断扰动应力场,就可形成多级、多类裂缝。这一理论分析为以下缝网改造技术的形成奠定了基础。

2 围岩—煤储层缝网改造技术

2.1 技术的适用性

2.1.1 技术优势

围岩抽采层缝网改造以其独有的技术优势为上述两大煤层气开发禁区的突破提供了新途径。

1) 钻孔不易失稳。岩体的力学强度远远高于含瓦斯煤体,钻进过程中钻孔失稳概率低,易形成一个高质量的井孔。

2) 围岩的可改造性强。任何围岩,除了个别水敏性极强的泥岩外,其脆性指数、力学强度都高于煤层,水力压裂时易形成裂缝。

3) 裂缝不易因应力敏感而闭合。随排采的进行、流体压力的降低,有效应力在不断增加,裂缝将逐渐闭合,支撑剂将会嵌入煤层,致使其导流能力显著降低,甚至完全消失。岩层的抗压强度远远高于煤层,抗支撑剂镶嵌能力高于煤层,因此排采过程中无法回避的应力敏感造成裂缝的闭合程度远远低于煤层。

4) 易发生速敏。煤层气排采要求“连续、缓慢、稳定”,其核心就是要控制速敏的发生。对于本煤层压裂井而言,如果排采失控,将会出现煤粉随流体产出,产出煤粉要么沉淀在口袋中,要么滞积在近井地带(往往为应力集中带),造成储层严重伤害。通过围岩井孔抽采瓦斯显著降低了速敏发生的概率。这是由于岩层的破碎能力显著低于煤层,不易形成岩粉;就是形成少量的岩粉,也不会像煤粉那样颗粒与颗粒之间存在强的结合力,在近井应力集中带形成致密的煤粉滞积环。

5) 适合于任何结构煤储层。对硬煤储层,在进行围岩缝网改造的同时也改造了煤层;对软煤储层,由于其自身不可压裂,改造的只是围岩。

围岩抽采层缝网改造以上述诸多技术优势,将为瓦斯抽采提供一种全新的技术途径,将推动我国煤层气商业化开发的进程。

2.1.2 技术的局限性

尽管围岩抽采层缝网改造具有上述多种优势,但也有其局限性:①煤层上下均为强水敏性岩层、遇水即

严重膨胀和软化时不适用;②围岩抽采层为富水性较强的含水层,或强化影响范围内有富水性强的含水层时不适用。

2.2 缝网改造增透技术

围岩抽采层—煤储层缝网改造技术适合于地面煤层气开发和井下瓦斯抽采,是一种相对普适性技术。其核心是根据煤岩体结构和力学性质,针对不同的井型采用不同的水力压裂工艺,最大限度地形成多级、多类裂缝体系,达到快速抽采瓦斯的目的。对于硬煤储层强化的是围岩和煤储层,瓦斯以一级扩散、两级渗流方式产出;对于软煤储层强化的是围岩,煤层不能被强化,只能形成挤胀和穿刺,瓦斯以两级扩散、一级渗流方式产出^[12](图 6)。但软煤可以通过水力压冲出煤卸压实现,其机理另文探讨。围岩—煤储层缝网改造可通过下述技术途径实现。

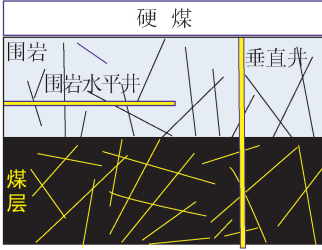
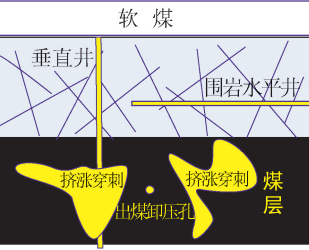
硬 煤	软 煤
	
改造类型及增透机理: 1. 水平井分段多簇射孔、四变压裂、水力喷射压裂 2. 直井与从式井四变压裂 3. 缝网改造对象为围岩+煤储层 4. 造缝增透为主、卸压增透为辅	改造类型及增透机理: 1. 水平井分段多簇射孔、四变压裂、水力喷射压裂、水力压冲 2. 直井与从式井围岩四变压裂 3. 缝网改造对象为围岩+煤储层 4. 围岩造缝增透、煤储层卸压增透
瓦斯运移产出机理: 解吸—扩散—煤层内渗流(至直井井筒)—围岩中渗流—水平井井筒产出。即—级扩散、两级渗流	瓦斯运移产出机理: 解吸—微孔扩散—大孔扩散—(出煤孔卸压带渗流产出)围岩内渗流—井筒产出

图 6 缝网改造技术图

2.2.1 四变压裂技术

四变压裂,即变排量、变砂比、变支撑剂和变压裂液,是一种实现缝网改造的有效途径。

2.2.1.1 变排量压裂

变排量压裂是指压裂过程中排量从低到高反复进行,对储层反复激动,低排量可以是停泵。随着排量的增加、压力增大,径向引张裂缝形成;当降低排量或停泵时,储层相应发生卸载,形成周缘引张裂缝;与此同时,先期形成的剪切裂缝,间或径向引张裂缝会发生壁面位移,从而实现裂缝的增容和自位支撑。反复的变排量泵注过程中,应力场不断被扰动,形成复合应力场,裂缝发生转向。从而形成了多级、多类裂缝网络。变排量是四变压裂的核心。

2.2.1.2 变砂比

变砂比是与变排量压裂相辅相成的一种压裂技术。在大排量时加入支撑剂,形成段塞;在低排量时不加支撑剂,形成隔离,最终形成房柱式支撑,一些学者将此压裂称为通道压裂^[26-27]。支撑剂的圆度、球度、抗压强度和破碎率决定了支撑裂缝的导流能力,石英砂的低抗压强度和高破碎率,往往难以维持支撑裂缝导流能力的长期稳定。而变砂比通道压裂则是由支撑剂建立支撑房柱,它自身可以没有导流能力,只要房柱之间的通道具有高导流能力就可为流体运移产出提供畅通通道。因此,通道压裂对支撑剂质量要求不严格,能够建立房柱即可。

变砂比压裂往往与裂缝端部脱砂、投球暂堵等辅助措施相结合,可达到事半功倍的效果。另外,变砂比通道压裂要求岩层有足够的强度^[28],所形成的房柱不被压垮,这正是围岩抽采层具备的优势。

2.2.1.3 变压裂液

变压裂液是指充分发挥各种压裂液的性能,实现多级、多类裂缝的有效支撑。一般采用廉价的活性水作为前置液充分实现缝网改造;以昂贵的胍胶等高黏、强携砂能力压裂液为携砂液,实现裂缝的有效支撑。变压裂液压裂即所谓的复合压裂。

2.2.1.4 变支撑剂

变支撑剂包括变粒径与变类型两层含义。①变粒径。在前置液中一般要加入一定量的粉砂,其作用有三:堵塞大裂缝降滤失、打磨裂缝壁面和支撑微裂缝;携砂液加入的中砂是形成导流通道的主体;最后加入粗砂形成近井地带高渗通道。②变支撑剂类型。变支撑剂类型与变压裂液密切相关。前置液采用廉价的活性水造缝,加入粉砂;携砂液如果采用活性水,则必须采用入木质支撑剂(如核桃壳)或者超低密度陶粒;携砂液如果采用胍胶等高黏压裂液,则可加入抗压能力强的支撑剂(如陶粒)。除煤层埋深较浅、闭合压力较低,或采用变砂比通道压裂外,一般不可采用石英砂做支撑剂。

四变压裂中的“四变”是相辅相成的,一个区块、一口井都要根据具体的储层条件进行压裂设计,真正实现一区一策、一井一法,达到缝网改造的目的。

2.2.2 地面煤层气开发缝网改造技术

根据前述的裂缝形成机制,结合四变压裂技术,任何煤体结构储层都可进行围岩—煤储层缝网改造,特别是全层均为软煤的储层优势更加显著。

2.2.2.1 水平井围岩缝网改造技术

在距煤层一定距离的顶板或底板围岩层内施工水

平井(图6)。压裂分段由煤岩体结构与力学性质、改造体积、地应力和施工能力决定,每段长度一般不超过100 m。可采用螺旋射孔或定向射孔,孔密度根据压裂需求而定,但均要多簇射孔。可采用封隔器机械封隔,也可水力喷射自我封隔分段压裂。对于埋深浅、地应力低的储层,压裂液可采用活性水或滑溜水;对深部高应力储层,则采用胍胶或清洁压裂液,但要与低温强抑制性破胶剂结合,最好加注自生氮,确保破胶彻底和快速返排。支撑剂以中砂为主,尾追粗砂,前置液中加入粉砂。泵注过程采用四变压裂,泵注排量和携砂量取决于煤岩体结构和改造体积等。

水平井的分段多簇射孔压裂,通过簇与簇、段与段之间的应力场干扰实现了裂缝的转向,加上“四变”技术,充分形成了多级、多类裂缝体系,达到缝网改造目的。在河南煤化集团中马村矿施工的地面U型井,水平井眼布置在煤层以上5 m左右的顶板围岩内,水平段长300 m左右,采用水力喷射分段压裂,通过围岩抽采层实现间接瓦斯抽采。由于和煤矿井下工程冲突,压裂规模较小。但获得了2 300 m³/d的产气量,这是国内外第一口进行围岩改造抽出瓦斯的地面井。

2.2.2.2 垂直井与丛式井缝网改造技术

四变压裂是垂直井和丛式井围岩缝网改造的技术途径。若煤层全部为软煤,可只打开围岩,通过四变压裂实现缝网改造;若煤储层存在硬分层,则将此硬分层与围岩一并打开;如果存在脆性的夹矸,也打开。采用四变压裂,并辅之以端部脱砂或投球暂堵技术,先压开煤层,后压开围岩抽采层。压裂液、支撑剂、泵注排量等的确定原则与水平井相同。可尝试不均匀射孔,类似于水平井的分段多簇射孔,煤层孔密度大些,这样更容易形成应力场的扰动。

围岩抽采层缝网改造技术在山西古交地面垂直井得到了成功应用。该区发育两层煤,煤层厚度1~3 m,两层煤间距为5~10 m,岩性为粉砂岩和粉砂质泥岩,煤层气含量10~15 m³/t,为碎粒煤。把煤层和煤层之间围岩一并压裂的2口井,稳产在1 600 m³/d;而只对煤层实施压裂改造的1口井仅150 m³/d。这一工业性试验充分说明围岩抽采层缝网改造的技术优势。

2.2.2.3 煤矿井下瓦斯抽采缝网改造技术

笔者于2004年提出将地面煤层气开发的压裂工艺移植到煤矿井下^[29],于2008年进行了真正意义上井下围岩—煤层水力压裂,这一工艺技术正以其强有力的生命力在走入工程化。

煤矿井下可把围岩和煤层作为整体进行缝网改

造,其实现途径为吞吐压裂、重复压裂、水力压冲等,工艺的选择取决于煤岩体结构和力学性质^[30]。围岩抽采层—煤储层缝网改造技术以其增透效果明显、成本低而成为煤矿井下瓦斯抽采的一种新技术,在河南、重庆、贵州、安徽、山西等高突矿井被逐渐推广。

3 结 论

鉴于现行的水力压裂工艺难以满足软煤和深部高应力煤储层煤层气商业化开发的需求,笔者提出了一种围岩—煤储层缝网改造技术。该技术通过不同的水力强化措施,对围岩—煤储层进行缝网改造,形成一个由多类、多级裂缝组成的缝网体系,达到大规模抽采瓦斯的目的。力学分析结果表明,水力压裂可形成径向引张、周缘引张和剪切裂缝等多类、多级裂缝。在分析了围岩抽采层缝网改造技术的适用性和局限性后,提出实现缝网改造的技术途径:四变压裂、水平井分段多簇射孔压裂、水力喷射分段压裂以及一些辅助措施。这一技术的核心是应力场的扰动,目的是形成多级、多类裂缝,大规模提升瓦斯抽采效率。煤层气地面开采和煤矿井下抽采成功的工业性试验,初步形成了一套井上下围岩—煤储层缝网改造技术体系。该技术突破了软煤储层不可强化、深部高应力储层低产两大禁区,其推广应用将极大地推进我国地面煤层气商业化开发进程,形成一种瓦斯区域治理新工艺。

参 考 文 献

- [1] KARACAN C Ö, RUIZ F A, COTÈ M, et al. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(2/3): 121-156.
- [2] GUNTER W D, GENTZIS T, ROTTENFUSSER B A, et al. Deep coalbed methane in Alberta, Canada: A fuel resource with the potential of zero greenhouse gas emissions [J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(S1): 217-222.
- [3] SCOTT S, ANDERSON B, CROSDALE P, et al. Coal petrology and coal seam gas contents of the Walloon Subgroup—Surat Basin, Queensland, Australia [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 70(1/3): 209-222.
- [4] Ian Palmer, Coalbed methane completions: A world view [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82(3/4): 184-195.
- [5] 郭红玉, 苏现波, 夏大平, 等. 煤储层渗透率与地质强度指标的关系研究及意义 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(8): 1319-1322.
GUO Hongyu, SU Xianbo, XIA Daping, et al. Relationship of the permeability and geological strength index(GSI) of coal reservoir and its significance [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(8): 1319-1322.
- [6] 陈作, 孟祥燕, 杜长虹, 等. 异常高地应力致密砂岩储层压裂技术研究 [J]. *天然气工业*, 2005, 25(12): 92-94.
CHEN Zuo, MENG Xiangyan, DU Changhong, et al. Fracturing techniques of tight sand reservoirs with abnormal high earth stress [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(12): 92-94.
- [7] 国家安全生产监督管理总局. AQ1027—2006 煤矿瓦斯抽放规范 [S]. 2006.
State Administration of Work Safety. AQ1027-2006 Code for coal mine gas drainage [S]. 2006.
- [8] 袁亮, 郭华, 沈宝堂, 等. 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙体 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 357-365.
YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, et al. Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 357-365.
- [9] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究 [J]. *煤炭学报*, 1998, 23(5): 20-23.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the "O shape" circle distribution characteristics of mining induced fractures in the overlying strata [J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 23(5): 20-23.
- [10] SU Xianbo, TANG Youyi. Coalbed methane drainage technology in Henan Province [C] // Proceedings of the 1999 International Symposium on Mining Science and Technology, 29-31 August 1999, Beijing, China.
- [11] 苏现波, 汤友谊, 盛建海. 河南省煤层气开发工艺初探 [J]. *焦作工学院学报*, 1998, 17(6): 406-408.
SU Xianbo, TANG Youyi, SHENG Jianhai. On three proposals of the coalbed methane development in Henan Province [J]. *Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science Edition*, 1998, 17(6): 406-408.
- [12] 苏现波, 陈江峰, 孙俊民, 等. 煤层气地质学与勘探开发 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 192-194.
SU Xianbo, CHEN Jiangfeng, SUN Junmin, et al. Coalbed gas geology and exploration [M]. Beijing: Science Press, 2001: 192-194.
- [13] 马耕, 巩春生. 虚拟储层抽采瓦斯技术探讨 [J]. *煤矿安全*, 2009, 40(5): 94-95.
MA Geng, GONG Chunsheng. Probing into gas drainage technology by virtual reservoir [J]. *Safety in Coal Mines*, 2009, 40(5): 94-95.
- [14] 吴奇, 胥云, 刘玉章, 等. 美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示 [J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(2): 1-7.
WU Ji, XU Yun, LIU Yuzhang, et al. The current situa-

- tion of stimulated reservoir volume for shale in U.S. and its inspiration to China [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(2): 1-7.
- [15] MAYERHOFER M J, LOLON E P, WARPINSKI N R, et al. What is stimulated rock volume [C] // paper 119890 presented at the SPE Shale Gas Production Conference, 16-18 November 2008. Fort Worth, Texas, USA. New York: SPE, 2008.
- [16] 张广清, 陈勉, 赵艳波. 新井定向射孔转向压裂裂缝起裂与延伸机理研究 [J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 116-119.
ZHANG Guangqing, CHEN Mian, ZHAO Yanbo. Study on initiation and propagation mechanism of fractures in oriented perforation of new wells [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 116-119.
- [17] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1165-1186.
- [18] HOEK E. 实用岩石工程技术 [M]. 刘丰收, 崔志芳, 王学潮, 等, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
HOEK E. Practical rock engineering [M]. LIU Fengshou, CUI Zhifang, WANG Xuechao, et al, trans. Zhengzhou: Yellow River Water Resources Press, 2002.
- [19] 邓华锋, 李建林, 刘杰, 等. 考虑裂隙水压力的岩体压剪裂纹扩展规律研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊 1): 297-302.
DENG Huafeng, LI Jianlin, LIU Jie, et al. Research on propagation of compression shear fracture in rocks considering fissure water pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 297-302.
- [20] 黄达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(3): 502-512.
HUANG Da, HUANG Runqiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolution of fissured rocks under unloading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(3): 502-512.
- [21] 黄达. 大型地下洞室开挖围岩卸荷变形机理及其稳定性研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
HUANG Da. Study on unloading deformation mechanism and stability of excavating surrounding rock mass of large underground caverns [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [22] 赵磊. 重复压裂技术 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008.
ZHAO Lei. Refracturing technology [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008.
- [23] 中国航空研究院. 应力强度因子手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 426-428.
Chinese Aeronautical Research Institute. Manual of stress intensity factor [M]. Beijing: Science Press, 1981: 426-428.
- [24] 刘洪, 易俊, 李文华, 等. 重复压裂气井三维诱导应力场数学模型 [J]. *石油钻采工艺*, 2004, 26(2): 57-61.
LIU Hong, YI Jun, LI Wenhua, et al. Mathematical model of 3D induced stress field in refracturing gas well [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2004, 26(2): 57-61.
- [25] 刘立峰, 张士诚. 通过改变近井地应力场实现页岩储层缝网压裂 [J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(4): 71-74.
LIU Lifeng, ZHANG Shicheng. Net fracturing by changing the surrounding in-situ stress in shale reservoirs [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(4): 71-74.
- [26] 钟森, 任山, 黄禹忠, 等. 高速通道压裂技术在国外的研究与应用 [J]. *中外能源*, 2012, 17(6): 39-42.
ZHONG Sen, REN Shan, HUANG Yuzhong, et al. Research and application of channel fracturing technique in foreign oil and gas fields [J]. *Sino-Global Energy*, 2012, 17(6): 39-42.
- [27] SOLIMAN M Y, AUGUSTINE J. Fracturing design aimed at enhancing fracture complexity [C] // SPE EUROPEAN/EAGE Annual Conference and Exhibition, 14-17 June 2010, Barcelona, Spain. New York: SPE, 2010.
- [28] EMMANUEL D, MATT G, MATT M, et al. Open-channel fracturing — A fast track to production [J]. *Oilfield Review*, 2011, 23(3): 4-17.
- [29] 河南理工大学. 煤矿井下钻孔水力压裂增透抽采瓦斯工艺: 中国, 200810230940.4 [P]. 2008-11-18.
Henan Polytechnic University. Gas drainage technology of permeability improvement by downhole hydraulic fracturing underground coal mine: China, 200810230940.4 [P]. 2008-11-18.
- [30] 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.
GUO Hongyu. Gas drainage theory and technology in underground coal mine based on hydraulic fracturing [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.

(修改回稿日期 2014-05-13 编辑 韩晓渝)