孙振敏.穿层割缝钻孔对煤体卸压增透效应的研究与应用[J]. 矿业安全与环保,2019,46(5):75-79. 文章编号:1008-4495(2019)05-0075-05

穿层割缝钻孔对煤体卸压增透效应的研究与应用

孙振敏

(大同煤炭职业技术学院,山西大同 037003)

摘要:采用数学方法对煤层割缝钻孔的卸压增透机理进行分析,针对平宝煤矿地质条件模拟得到 该煤矿最优的水力割缝高度和间距分别为0.02 m和4 m。通过现场工业性试验,对比分析了割缝钻 孔和普通钻孔的瓦斯抽采情况,结果表明:30 d 内割缝钻孔抽采瓦斯流量是普通钻孔的3 倍,抽采瓦斯 浓度为普通钻孔的2~3 倍,并且割缝钻孔的瓦斯浓度能够长时间保持在80%左右;后续巷道掘进月进 度也由原来的60~80 m 提高至100~120 m,掘进效率提高30%~50%。该项技术能够较好解决煤层 瓦斯突出难题,促进煤矿的安全高效生产。

关键词:高瓦斯煤层;瓦斯抽采;卸压增透;水力割缝;割缝钻孔;FLAC^{3D}模拟 中图分类号:TD712 文献标志码:A

Research and Application of Pressure Relived and Permeability Enhanced Effect of Perforated Slotting Borehole on Coal

SUN Zhenmin

(Datong Vocational and Technical College of Coal, Datong 037003, China)

Abstract: The mechanism of pressure relieved and permeability enhanced of slotting borehole in coal seam was analyzed by mathematical method. Based on the geological condition simulation of Pingbao Coal Mine, the optimal height and spacing of hydraulic slotting were 0.02 m and 4 m respectively. Field industrial tests were carried out to compare and analyze the gas extraction situation of slotting borehole and ordinary borehole. The results show that the gas extraction volume of slotting borehole is 2 to 3 times as that of ordinary borehole, and the gas concentration of slotting borehole can be maintained at about 80% for a long time; the monthly tunneling progress of subsequent roadways is raised to a range from 100 m to 120 m, which used to be between 60 m and 80 m, the tunneling efficiency increases by 30% to 50%. This technology can solve the problem of gas outburst in coal seam and promote the safe and efficient production of coal mine.

Keywords: coal seam with high gas content; gas extraction; pressure relieved and permeability enhanced; hydraulic slotting; slotting borehole; FLAC^{3D} simulation

目前,卸压增透煤体的方法主要有钻孔、高能量 液体扰动和气体爆破扰动等,这些方法能够在一定程 度上增加煤层的渗透性,提高瓦斯抽采效率,促进煤 矿安全高效生产^[1-3]。穿层割缝钻孔卸压增透煤体是 一种利用岩层作为保护层的瓦斯抽采技术,该技术应 用范围较广,近年来迅速在国内发展应用^[4-7]。

高压水射流割缝技术会对钻孔周围的煤体产生

扰动,在排出煤渣的同时在煤体中形成一个割缝空间^[8-9]。这一方法大大扩展了煤体中的裂缝和卸压 区范围,提高了瓦斯抽采效率。笔者通过应用高压 水射流技术对穿层煤体进行割缝,以解决高应力、低 渗透煤体瓦斯抽采难题,促进煤矿的安全高效开采。

1 煤体割缝卸压增透技术研究

1.1 煤体割缝卸压增透机理

瓦斯压力、地应力及其他因素在瓦斯抽采钻孔 周围形成了应力增高区,这会导致煤层渗透性降低, 并且阻碍瓦斯扩散,进而影响抽采钻孔有效半 径^[10-12]。为了降低应力增高区内的高积聚应力,进

收稿日期:2018-12-19;2019-02-27修订

作者简介: 孙振敏(1986—), 男, 河南郑州人, 硕士, 讲师, 主要从事采矿工程相关方面的研究与教学工作。E-mail: 1362999670@qq. com。

而增加抽采钻孔周围煤体的渗透性,采用高压水射 流割缝的方式对煤体进行卸压增透,如图1所示。



图 1 煤体割缝卸压增透示意图

首先需要在煤层中施工1个钻孔,然后再利用 高压水射流割缝钻头对煤层进行割缝操作,从而在 煤体中形成具有一定宽度的不规则平面空间。间隔 固定距离重复上述割缝操作,在煤体中形成多个割 缝。这一系列的割缝将有助于消除钻孔周围应力集 中影响,以及克服瓦斯抽采效率低的难题。

采用高压水射流的方式对煤体进行割缝,能够 增加煤体内的暴露面积,并在瓦斯梯度力和地应力 的影响下使煤体向割缝空间移动,促使煤体产生大 量的拉剪裂隙。渗透性的增加促进了煤体的卸压, 并且较大的割缝和微裂隙能够为瓦斯的流动提供良 好的路径,有效提高煤体瓦斯抽放效率和卸压程度。 另外,割缝能够促进钻孔周围煤体碎裂,在某种程度 上释放了煤体的突出能,从而有效地降低煤体发生 突出的危险性。

1.2 割缝煤体内瓦斯流动数学模型

1.2.1 割缝煤体内瓦斯流动数学模型

瓦斯在煤体内的流动是一个扩散和渗透的过程^[13]。在卸压范围内瓦斯流动可以假定为从煤体 向割缝的毛细流动过程,且瓦斯流动毛细管模型满 足菲克扩散定律和达西渗透定律。这些定律将割 缝卸压影响范围内的煤体划分为主要影响区和边 界影响区。建立边界条件以获得瓦斯从主要影响 区和边界影响区向割缝流动的时间函数,所建模型 如图 2 所示。



图 2 割缝煤层卸压范围示意图

瓦斯在主要影响区内任意微小单元的毛细管微 通道中流动时,可采用如下时间函数表示:

$$q_{M}(t) = \frac{\pi k_{1}^{4} p_{0}}{128 \mu \left(h - \frac{b}{2}\right)^{2} - \left(l - h + \frac{b}{2}\right)^{2}} \cdot \frac{\left(h - \frac{b}{2}\right)^{2} - \left(l - h + \frac{b}{2}\right)^{2}}{l} e^{-4k_{2}l} + 2c_{1}Dk_{1}^{2}\left[1.8519\exp\left(-2k_{2}l - \frac{\pi^{2}Dt}{l^{2}}\right) + 0.5583\exp\left(-2k_{2}l - \frac{9\pi^{2}Dt}{l^{2}}\right) + 0.3268\exp\left(-2k_{2}l - \frac{25\pi^{2}Dt}{l^{2}}\right)\right]$$
(1)

瓦斯从边界影响区流动到割缝位置时,可采用 如下时间函数表示:

$$q_{B}(t) = \frac{\pi k_{1}^{4} p_{0}}{128 \mu R^{2}} \cdot \frac{R^{2} - (l - R)^{2}}{l} e^{-4k_{2}l} + 2c_{1}Dk_{1}^{2} \left[1.851 9 \exp\left(-2k_{2}l - \frac{\pi^{2}Dt}{l^{2}}\right) + 0.558 3 \exp\left(-2k_{2}l - \frac{9\pi^{2}Dt}{l^{2}}\right) + 0.326 8 \exp\left(-2k_{2}l - \frac{25\pi^{2}Dt}{l^{2}}\right) \right]$$
(2)

式中: k_1 、 k_2 和 c_1 为大于0的相关系数;l、R和h为 毛细管的几何参数,m;D为瓦斯在多孔介质中的扩 散速度,m³/s;b为割缝宽度,m; μ 为瓦斯的动力黏 度,Pa·s; p_0 为煤体内瓦斯初始压力,MPa;t为煤体 内瓦斯的流动时间,s。

1.2.2 卸压范围内瓦斯突出分析

根据瓦斯流量数学模型,可以对割缝煤体卸压 范围内瓦斯流量随时间变化规律进行分析,得到煤 体中任何微小煤体单元内瓦斯突出消除的判据及消 除瓦斯突出时间判据。消除瓦斯突出的判据为:

$$q_{\text{remain}} = q_0 - \frac{10^3 \int_0^t q(t) \, dt}{\rho_0 l_0^3} \leqslant 8 \, \text{m}^3/\text{t}$$
(3)

式中: q_0 为煤体内初始相对瓦斯涌出量, m^3/t ;q(t) 为煤体内 t 时间点的瓦斯涌出量, m^3 ; l_0 为煤体中任 何微小煤体单元边长,m; ρ_0 为煤体密度, kg/m^3 。

将公式(1)和(2)分别代入公式(3)中,由于 q_0 是 可测定的,且 ρ_0 和 l_0 也是已知的,因此可以计算求解 出消除主要影响区和边界影响区的时间,然后就可以 得到消除整个割缝卸压区瓦斯突出的总时间为:

 $t = \max(t_1, t_2)$ (4) 式中: t_1 为消除主要影响区瓦斯突出的时间, $s;t_2$ 为 消除边界影响区瓦斯突出的时间,s。

1.3 割缝钻孔数值模拟

1.3.1 数值模拟方案

关于割缝钻孔对煤体中应力改变的影响,以河 南省平顶山市平宝煤矿 12041 工作面地质条件为研 究背景,通过建立 FLAC^{3D}三维数值模型进行模拟研 究,其具体参数如表 1 所示,所建立的模型情况如 图 3 所示^[14-15]。

主1 二维粉估措刑 会粉 和 计 田 冬 件

农T 二年以值代王乡 <u>风</u> 情起并从目		
参数类别		参数取值
模型尺寸	长/m	40
	宽/m	30
	高/m	33
割缝尺寸	长/m	20
	宽/m	2.4
	高/m	0. 01 ,0. 02 ,0. 03
割缝间距/m		3,4,5,6
模型倾角/(°)		0
割缝角度/(°)		0
模型边界条件		模型上表面施加应力载荷:10 MPa; 模型四周应力载荷:10 MPa



图 3 FLAC^{3D}三维数值模拟模型

1.3.2 数值模拟结果

按照表1所示参数对不同割缝高度和割缝间距 情况下进行数值模拟,关于多个割缝钻孔之间的应 力叠加情况如图4所示。



由图4可知,当割缝高度为0.01 m时,割缝间 距为3 m的应力叠加峰值最大,且随着割缝间距的 增大,应力叠加峰值呈现减小的趋势;当割缝高度为 0.03 m时,应力叠加峰值较割缝高度为0.01 m时要 大,但变化趋势基本一致;而当割缝高度为0.02 m 时,割缝间距为4 m的应力叠加峰值最大,达到 14 MPa。由此可见,在割缝高度为0.02 m、割缝间距 为4 m时,多个割缝钻孔之间的煤体容易在较高的 应力叠加作用下被压裂而形成卸压区,进而实现煤 体的卸压增透效果。

在割缝高度为0.02 m、割缝间距为4 m 时,煤体 内应力演化情况如图 5 所示。由图 5 可知,对煤体 进行割缝后,在垂直横截面上将会形成应力卸压区, 且受重力影响在割缝上方形成的卸压区面积要远大 于在其下方形成的卸压区面积。每个割缝上方形成 的卸压区相互影响,进而连成一片,形成更大范围的 卸压区。



图 5 垂直截面应力分布图

在割缝高度为0.02 m、割缝间距为4 m 时,割缝 上方不同高度位置,在3个割缝叠加影响下煤体内 的最大、最小应力和最大位移变化规律如图6 所示。



个韵建对深体的影响对比消沉

由图 6 可知,此时煤体内的最大和最小应力值 基本与单独 1 个割缝影响下的保持一致,然而最大 位移量变化情况截然不同,这主要是因为多个割缝 提供的变形空间要远大于 1 个割缝的。可见多个割 缝将会对煤体中应力的释放产生明显的影响,进而 为后续瓦斯的高效抽采奠定基础。

通过对割缝钻孔的定量模拟分析,得到了基于 平宝煤矿 12041 工作面地质条件下的最优割缝钻孔 参数为:割缝钻孔的割缝高度为0.02 m,割缝间距为 4 m,考虑到割缝宽度为2.4 m,因此相邻割缝钻孔之 间的孔间距为6.4 m。

2 现场应用

Vol. 46 No. 5

Oct. 2019

选择平宝煤矿 12041 工作面作为试验地点,该 工作面主采煤层初始瓦斯压力为 1.38 MPa,瓦斯含 量为 10.46 m³/t。12041 工作面运输平巷已经掘进 400 m,轨道平巷已经掘进 450 m,在掘进过程中存在 高瓦斯积聚、卡钻和钻喷等问题,严重阻碍了工作面 的正常开采。为了解决这个问题,基于现场实际地 质情况,提出采用底板穿层钻孔对煤体进行割缝处 理来增加煤体的渗透性,从而提高煤层瓦斯抽采效 率和降低掘进端头应力集中。现场试验抽采钻孔具 体参数为:沿着巷道掘进方向,每隔 5 m 布置 1 组钻 孔(每组 5 个钻孔),共布置 18 组钻孔。钻孔布置于 掘进端头前方 100 m 范围内,其中前 12 组钻孔为煤 体割缝卸压抽采钻孔,后 6 组钻孔为普通抽采钻孔。 确定现场每排钻孔之间的孔间距为 6.4 m,割缝宽度 为 2.4 m。具体布置情况如图 7 所示。



现场施工割缝钻孔时,按照以下要求进行:

1) 先利用直径 94 mm 岩石钻头进行岩石段的 钻孔施工,直到钻进至煤层顶板,退出钻杆换上直径 75 mm 的水力割缝钻头(喷嘴直径为 0.02 m),当水 力割缝钻头钻进至煤层底板位置后实施水力割缝。

2)执行水力割缝措施时,采用进钻割缝方案。 每一根钻杆割缝时间为1 min,第1 根钻杆割缝时压 力应不大于10 MPa,保证煤屑顺利地从钻孔流出来 以后,第2 根钻杆割缝时压力可调节到15 MPa,第3 根钻杆割缝时压力调节到20 MPa,以后压力控制在 20~25 MPa内。

3)每割缝完成1根钻杆后,应先调节溢流阀将 管路压力降到0 MPa,并关闭进水辫管路上的球阀, 确保管路中没有水流经过,才能进行拆卸钻杆作业。

4)每次水力割缝时,在钻进钻杆时,要先将钻杆 清洗一遍,以保证钻杆内部没有颗粒状的煤体。

3 结果与讨论

3.1 瓦斯抽采量对比分析

对每组钻孔中的2*和4*钻孔抽采瓦斯流量(不 少于30d)进行对比分析,且保证瓦斯抽采期间封孔 质量合格。对割缝钻孔和普通钻孔(均为2*钻孔和 4*钻孔)瓦斯抽采流量数据进行统计并平均化,忽略 不可靠数据,结果如图8所示。



图 8 普通钻孔和割缝钻孔瓦斯抽采数据对比

图 8 中瓦斯抽采结果表明,对煤体进行割缝后 能够有效提高瓦斯抽采流量。割缝钻孔单孔最大 瓦斯抽采流量为 54.45 L/min,4[#]割缝钻孔的抽采 能力比4[#]普通钻孔的抽采能力大 3.7 倍。统计 30 d 的结果可知,割缝钻孔总的瓦斯抽采流量是普通钻 孔的3 倍。

高压水射流对煤体进行割缝的同时也将水注 入到煤体中,这有助于降低煤体的渗透性和弱化瓦 斯的解吸过程。因此,瓦斯抽采被抑制,这被称作 "水锁"效应,这也是导致瓦斯抽采初始值较低的 原因。随着时间的推移,水蒸发而离开煤体,"水 锁"效应被弱化。此外,割缝后钻孔周围的应力状 态重新分布,这一过程促使煤体中产生了大量的裂 隙,并且增加了煤体的暴露面积及扰动范围。这也 是造成瓦斯解吸速率及抽采量保持在较高水平的 原因。

3.2 瓦斯抽采浓度对比分析

对割缝钻孔和普通钻孔的抽采瓦斯浓度进行对 比分析,如图9所示。



图 9 普通钻孔和割缝钻孔抽采瓦斯浓度对比

由图9可知,普通钻孔平均抽采瓦斯浓度低于 30%,相对不稳定且具有较大的波动性。割缝钻孔 平均抽采瓦斯浓度保持在80%左右,且流量相对稳 定。由此可见,煤体割缝后对钻孔周围的应力集中 进行了转移和释放,并且扩大了钻孔的有效抽采半 径。瓦斯释放通道的增加,促进了抽采瓦斯浓度能 够长时间维持在较高的水平。

3.3 巷道掘进速度对比分析

当采用割缝钻孔对巷道掘进端头前方煤体实施 瓦斯预抽采措施后,对初始瓦斯涌出速度 q 和钻屑 量 S 这 2 个功效指标进行分析,得知这 2 个功效指 标均显著下降,表明煤层突出危险性降低,从而可以 提高巷道掘进速度。现场工业性试验期间巷道掘进 情况如图 10 所示。



图 10 割缝区前后巷道掘进日进度

由图 10 可知,在未进行割缝钻孔预抽瓦斯区域 内,巷道掘进进度控制在每天 1.6~3.2 m,每月 60~ 80 m,掘进速度因大量的瓦斯涌出而受到严重限制。 而在割缝钻孔预抽瓦斯区域内,由于高效率的瓦斯 抽采降低了煤层中瓦斯的积聚程度,巷道掘进进度 控制在每天 3.2~4.8 m,每月 100~120 m,巷道掘 进效率显著提高。

4 结论

1)穿层割缝钻孔能够有效地提高煤体的卸压增透效果,并通过数学的方法对其机理进行了分析。数值模拟了不同割缝宽度和割缝间距情况下的应力叠加情况,得出适合平宝煤矿的最优割缝宽度为0.02 m,割缝间距为4 m。

2)普通钻孔和割缝钻孔现场工业性试验结果表 明:30 d 内割缝钻孔抽采瓦斯流量是普通钻孔的3倍, 抽采瓦斯浓度为普通钻孔的2~3倍,并且割缝钻孔 的抽采瓦斯浓度能够长时间保持在80%左右。

3)现场巷道掘进工程实践表明,在对掘进端头前方进行割缝钻孔预抽瓦斯处理后,巷道月掘进进度由原来的60~80 m提高至100~120 m,掘进效率提高30%~50%。可见割缝钻孔能够有效降低煤与瓦斯突出危险性,确保煤炭资源的安全高效开采。

参考文献:

- [1] 林柏泉,孟凡伟,张海宾.基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J].煤炭学报,2011,36(1):75-79.
- [2] 刘畅,杨增强,弓培林,等.工作面过空巷基本顶超前破断压架机理及控制技术研究[J].煤炭学报,2017,42(8):1932-1940.
- [3] 张永将,孟贤正,季飞.顺层长钻孔超高压水力割缝增透 技术研究与应用[J].矿业安全与环保,2018,45(5):1-5.
- [4] 俞启香,程远平,蒋承林,等.高瓦斯特厚煤层煤与卸压 瓦斯共采原理及实践[J].中国矿业大学学报,2004, 33(2):127-131.

(下转第84页)

煤矿工作面涌水量。

4 结论

 1)文家坡煤矿4101工作面由于煤层厚度较薄, 导水断裂带发育高度未波及洛河组巨厚含水层,其 主要涌水水源包括宜君组、直罗组和煤系延安组承 压水含水层。

2)经过对预测结果分析对比,在该工作面水文 地质条件下,"垂向入渗—侧向径流"模型预测的工 作面正常涌水量与实测值最为接近。因此该模型可 以作为文家坡煤矿后续工作面涌水量预测模型,也 可为相似水文地质条件下的煤矿工作面涌水量预测 提供指导。

参考文献:

- [1] 余茂君.煤矿水害 6 大致命隐患[J].矿山安全, 2006(9):96-97.
- [2]李超峰,虎维岳.回采工作面顶板复合含水层涌水量时 空组成及过程预测方法[J].水文地质工程地质, 2018(3):1-13.
- [3] 孙福勋,张元杰,丁涛.解析法和比拟法在矿井涌水量 分析及预测中的应用[J].科技创新与应用,2016(8): 34-35.
- [4] 马青山, 骆祖江. 解析法和数值法在矿井涌水量预测中的比较[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(4):63-66.

- [5] 胡建平. 灰色关联分析在矿井涌水量计算中的应用[J]. 矿业安全与环保, 1996(3):40-42.
- [6] 赵春永,梅玲,党宇宁.矿井涌水量计算方法分析[J]. 中国资源综合利用,2015,33(9):62-63.
- [7] 段红民. 彬长矿区特厚煤层顶水安全开采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11):22-26.
- [8] 刘会彬, 胡少博, 尹润生,等. 鄂尔多斯盆地彬长矿区煤
 层气赋存特征[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(4):20-23.
- [9] 王玉林. 承压地下水开采井流模型及其渗流理论研 究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [10] 武强.煤矿防治水手册[M].北京:煤炭工业出版社, 2013.
- [11] 杨佩. 榆神矿区顶板含水层涌(突)水条件综合研究[D]. 西安:西安科技大学, 2017.
- [12] 刘英锋. 彬长矿区巨厚含水层特厚煤层综放开采防治 水技术研究[D]. 西安:西安科技大学, 2015.
- [13] 刘英锋,郭小铭.导水裂缝带部分波及顶板含水层条件下涌水量预测[J].煤田地质与勘探,2016,44(5):97-101.
- [14] 曹洋, 杜成波, 李洋. 裘布依公式在实际应用中的缺陷分析[J]. 地下水, 2008, 30(5):6-8.
- [15] 罗安昆,王皓,郭小铭,等. 巨厚含水层采动影响下矿井涌水量预测[J].煤矿安全,2017,48(9):182-185.
 (责任编辑:陈玉涛)

- [5] YANG Z Q, DOU L M, LIU C, et al. Application of highpressure water jet technology and the theory of rock burst control in roadway [J]. International Journal of Mining Science & Technology, 2016, 26(5):929–935.
- [6] 刘生龙,周玉竹,邱居德,等.超高压水力割缝在坚硬突出煤层石门揭煤预抽瓦斯防突措施中的应用[J]. 矿业 安全与环保,2017,44(5):64-67.
- [7] 范晓刚,王宏图,胡国忠,等.急倾斜煤层俯伪斜下保护 层开采的卸压范围[J].中国矿业大学学报,2010, 39(3):380-385.
- [8] 窦林名,杨增强,丁小敏,等.高压射流割煤技术在防治 冲击地压中的应用[J].煤炭科学技术,2013,41(6): 10-14.
- [9] 李海洲.水力采煤技术论文集[C].北京:煤炭工业出版 社,1987.
- [10] 李锋,马耕,陶云奇.水力冲孔钻孔合理抽采时间研 究[J].中国煤炭,2018,44(3):136-139.

- [11] 王耀锋,薛伟超,李艳增,等.诱导应力场对井下多孔压裂缝网形成的导控作用研究[J].煤矿安全,2018,49(11):10-16.
- [12] 李志强,成墙.煤层瓦斯强化抽采工程试验与多过程耦 合渗流数值解[J].煤炭工程,2018,50(11):74-78.
- [13] 陈绍杰. 低渗透煤层高压注水驱替瓦斯机理及应用研究[M]. 北京:北京科技大学,2018.
- [14] 王力,谢友友,张连军,等.穿层控制爆破的卸压、增透作用分析及数值模拟[J].矿业安全与环保,2009,36(2):
 4-9.
- [15] SHEN C M, LIN B Q, MENG F W, et al. Application of pressure relief and permeability increased by slotting a coal seam with a rotaty type cutter working caross rock layers [J]. International Journal of Mining Science & Technology, 2012, 22(4):533-538.

(责任编辑:李 琴)

⁽上接第79页)