



推荐阅读:

[综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)

[高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)

[超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)

[风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究](#)

[深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)

[水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)

[巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)

[高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)

[高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)

[寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)

[我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)

[基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)

[原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)

[不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)

[顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)

[煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

马智会,潘荣锬,马智勇,等.顺层钻孔瓦斯抽采漏气规律及封孔技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):90-96. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.011

MA Zhihui, PAN Rongkun, MA Zhiyong, et al. Study on gas leakage law and hole sealing technology of gas drainage in layered drilling[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 90-96. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.08.011

顺层钻孔瓦斯抽采漏气规律及封孔技术研究

马智会^{1,2}, 潘荣锬¹, 马智勇³, 李 聪¹, 胡代民¹

(1.河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454000;2.义马煤业集团股份有限公司 生产技术处,河南 三门峡 472300;
3.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037)

摘 要:顺层钻孔瓦斯抽采时,在矿山压力作用下,极易出现抽采漏气的情况,为了提高顺层钻孔瓦斯抽采效果,据巷道围岩应力分布规律,分析了抽采钻孔轴向和径向的应力和裂隙分布特征,提出顺层抽采钻孔的4种漏气通道分别为:封孔材料漏气、钻孔周围煤体漏气、封孔材料与钻孔壁间隙漏气以及邻近钻孔影响漏气。基于漏气通道分析结果,得出顺层钻孔抽采应堵实钻孔径向松动圈和设计合理的封孔长度的封孔原则。根据钻孔漏气机理及封孔原则并结合现场条件,对孟津煤矿原聚氨酯封孔工艺进行考察并优化,得出优化后的封孔深度应为20 m,并结合径向裂隙范围,提出了两堵一注全程注SRS-II高强微膨胀型快速凝固封孔材料的封孔工艺,在12030运输巷进行了工业试验。通过对封孔优化前后的跟踪监测数据进行对比分析,得出封孔优化后的瓦斯抽采体积分数为原封孔工艺瓦斯抽采体积分数的1.1~1.9倍,优化后的瓦斯抽采纯量为原封孔工艺的2.6倍左右,且原封孔工艺较封孔优化后的抽采体积分数和抽采纯量衰减明显。因此,优化后的封孔工艺抽采效果较原工艺明显提高,为同类型矿井顺层抽采封孔提供了借鉴。

关键词:顺层抽采;围岩应力;钻孔应力;裂隙分布;漏气通道;封孔;抽采效果

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)08-0090-07

Study on gas leakage law and hole sealing technology of gas drainage in layered drilling

MA Zhihui^{1,2}, PAN Rongkun¹, MA Zhiyong³, LI Cong¹, HU Daimin¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Production Technology Department, Yima Coal Industry Group Co., Ltd., Sanmenxia 472300, China; 3. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400037, China)

Abstract: When gas is pumped along the stratum, under the action of mine pressure, gas leakage is very easy to occur. In order to improve the effect of bedding boreholes, the axial and radial stress and fracture distribution characteristics of the drainage holes were analyzed through the stress distribution law of surrounding rock of roadway. Four types of air leaking channels were put forward: leakage of sealing material, leakage of coal around the borehole, leakage between sealing material and borehole wall, and leakage influenced by adjacent borehole. Based on the gas leakage channels, the principle of sealing the radial loosening ring of the solid borehole and the reasonable design of the length of the sealed hole should be obtained. According to the mechanism of air leakage and the principle of hole sealing, combined with the site conditions, the original polyurethane hole sealing process in Mengjin coal mine was investigated and optimized. It was concluded that the optimized sealing depth should be 20 m. Combined with the radial fracture range, the sealing technology of two blocks and one injection of SRS-II high strength micro expansion rapid solidification sealing material was put forward. The industrial test was carried out in No.12030 transportation roadway. By comparing and analyzing the tracking and monitoring data before and after the optimization, it is concluded that the volume fraction of gas drainage after the optimization of hole sealing is 1.1~1.9 times of the original hole

收稿日期:2020-04-02;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674103)

作者简介:马智会(1985—),男,河南义马人,工程师,博士研究生。E-mail:huaer702@163.com

通讯作者:潘荣锬(1980—),男,广西南丹人,副教授,博士生导师。E-mail:prk2008@126.com

sealing process, and the pure quantity of gas drainage after the optimization is about 2.6 times of the original hole sealing process, and the original sealing process has a significant attenuation compared with the optimized sealing concentration and extraction pure volume. Therefore, the extraction effect of the optimized sealing technology has significantly improved compared with the original technology, which provides a reference for the same type of mine drainage and sealing.

Key words: bedding extraction; surrounding rock stress; borehole stress; crack distribution; gas leakage channel; sealing hole; extraction effect

0 引言

《防治煤与瓦斯突出细则》要求顺层钻孔及穿层钻孔抽采是针对不具备保护层开采条件的矿井区域消突的主要措施^[1],而顺层瓦斯抽采效果能否成功的关键技术就是封孔的质量^[2]。目前,现有的封孔工艺有黄泥浆封孔、水泥砂浆封孔、混合浆液封孔、聚氨酯封孔等。黄泥封孔已基本被淘汰;水泥浆封孔在经历矿压作用后,容易漏气;聚氨酯封孔应用范围广、适用性较强,但是成本高、膨胀后强度低;两堵一注适用性强,但仍存在工艺复杂等缺点^[3-8]。因此,无论采用何种形式的封孔工艺,都存在不同程度的漏气现象。

目前,国内部分学者及工程技术人员对封孔的漏气机理已进行了研究。乔元栋等^[9]建立了顺层钻孔漏气通道模型,得出钻孔周围卸压区与巷道的卸压区叠加贯通,形成钻孔漏气的主要通道。王振峰等^[10]认为由于煤体应力的动态转移,使水泥浆封孔段被破坏,从而在水泥与煤壁之间形成漏气通道;胡胜勇等^[11]指出在抽采负压作用下,外界空气经巷道松动圈和钻孔松动圈进入孔内,且在不同的抽采阶段表现为不同漏气特点。周福宝等^[12]建立了孔内漏气和孔外裂隙漏气的数学模型,并通过现场实测进行了验证。王宁等^[13]测得孔内不同位置的瓦斯浓度,得出钻孔内瓦斯流动特征及漏气的位置。王志明等^[14]通过动态漏气圈模型,得出不同时间、不同压力下钻孔的漏气圈特性及抽采过程中漏气圈的动态变化特征。郭平^[15]根据影响抽采效果的因素,系统总结出6种井下瓦斯抽采钻孔漏气物理模型;周厚权等^[16]把钻孔漏气点分为3类,即封孔材料与抽采管的间隙、封孔材料与钻孔孔壁的间隙、钻孔周围煤体存在的复合裂隙。综上所述,针对顺层瓦斯抽采钻孔的漏气机理的系统分析还少有涉及。

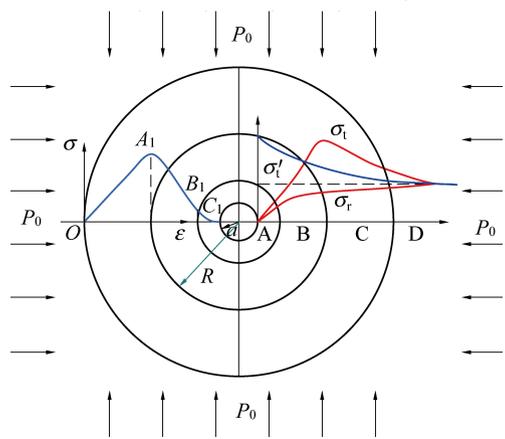
因此,笔者通过分析巷道和钻孔应力分布特征、钻孔的裂隙分布特征,进而得出抽采钻孔的漏气通道,再基于漏气通道提出封孔要求,并结合义马“三软”煤层,开展了工业试验,对抽采钻孔封孔工艺进行了合理优化。

1 钻孔应力及裂隙分布特征

1.1 巷道围岩应力分布特征

巷道开挖后,围岩应力重新分布,在巷道周边形成破碎区、塑性区和弹性区^[17];巷道应力重新分布必然导致钻孔周围的应力及裂隙发生改变。因此,正确分析巷道的应力及裂隙特征才能更加准确地把握钻孔的应力及裂隙分布特征。

巷道开挖前,煤岩体未受扰动,处于弹性状态,煤层所承载荷为上覆岩层重力。巷道开挖后,应力重新分布,并出现应力集中(图1)。由图1中 σ'_i 曲线可知,最大应力小于煤体破坏强度,所以在巷道壁面达到最大应力时,围岩仍处于弹性状态^[18]。由图1中 σ_i 曲线可知,最大应力大于煤体强度,巷道壁面煤体破坏,应力集中峰值向围岩深部转移,从而在巷道围岩附近形成了破碎区、塑性区、弹性区和原岩应力区。



P_0 —原岩应力; σ —应力; ε —应变; σ'_i 、 σ_i —煤体发生破坏前后的切向应力; σ_r —径向应力; a —巷道半径; R —塑性区半径;
A—破碎区;B—塑性区;C—弹性区;D—原岩应力区;
 $OA_1B_1C_1$ —应力-应变曲线

图1 巷道围岩弹塑性区及应力分布

Fig.1 Elastic plastic zone and stress distribution of surrounding rock of roadway

图1中的煤岩应力应变曲线,弹性区围岩对应于 OA_1 段,塑性区围岩对应于 A_1B_1 段,破裂区对应于 B_1C_1 段。

巷道开挖后,产生自由面,应力重新分布,围岩

由三维应力状态变为二维应力状态,最大主应力为切向应力,当应力小于岩体强度时,在巷道壁的切向应力为最大值,如图1中 σ_1' 所示,最小主应力为径向应力,在巷道壁径向应力最小,向围岩深部逐渐变大^[19],如图1中 σ_r 所示。这个应力调整过程是瞬间完成的。巷道开挖后,如果集中应力高于岩体的强度,那么巷道壁面煤岩体就会发生破坏,应力转移至巷道围岩深部,直到围岩应力稳定为止。

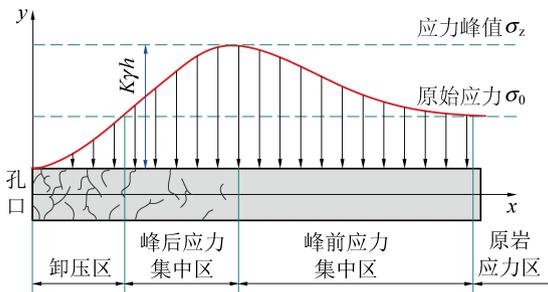
1.2 钻孔裂隙分布特征

钻孔的应力分布同巷道应力分布基本一样,因此钻孔周围裂隙区域可划分为:破碎区、塑性区和弹性区。

1.2.1 钻孔轴向应力及裂隙分布

巷道开挖后,应力重新分布,而抽采钻孔形成后,应力平衡再次被破坏,钻孔周围应力再次重新分布,根据煤体所处的力学状态,可将孔附近围岩沿轴线方向划分为卸压区、峰前应力集中区、峰后应力集中区和原岩应力区。

卸压区煤体经历了极限应力,发生了塑性变形,围岩破碎、裂隙发育且已无承载能力,所以卸压区属于破碎区(图2);峰后应力集中区煤体经历了最大应力转移后,煤体发生破坏,形成宏观裂缝;峰前应力集中区煤体虽未经历极限应力,但所承受的支撑压力逐渐增加,但还未达到煤体的破坏强度,煤体未发生破坏;原岩应力区煤体力学状态和瓦斯赋存情况未发生变化。



k —应力集中系数; γ —煤层上覆岩层容重; h —煤层采深

图2 钻孔轴向应力分布示意

Fig.2 Distribution of axial stress in borehole

通过多个矿区现场实测,得出回采巷道的侧向支撑压力峰值区域一般自巷道壁至煤体深部10~15 m,抽采钻孔必然要经历上述4个区域,忽略钻孔本身的影响,可认为钻孔轴向裂隙从孔口至应力峰值区为裂隙发育区。

1.2.2 钻孔径向应力及裂隙分布

抽采钻孔形成后,孔壁周围的煤体同巷道开挖后一样,分为破碎区、塑性区和弹性区,如图3所示。根据孔周围的应力分布特征可知,钻孔的卸压区半径(图3中的 R_M),等于钻孔中心到恢复至原岩应力

的距离(塑性区与弹性区的交界处)。

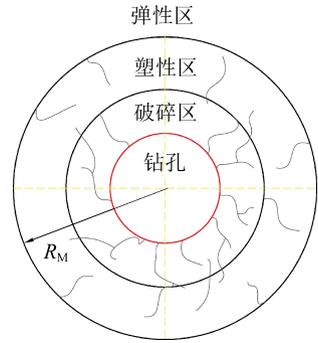


图3 钻孔径向煤体裂隙分布示意

Fig.3 Distribution of radial coal body fractures in boreholes

将孔周围煤体假设为理想弹塑性软化模型,由式(1)可近似计算得出抽采钻孔卸压区的半径,即

$$R_M = \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}\mu_r} \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \ln \left(\frac{\gamma H}{\sigma_c} \right) \right] r_0 \quad (1)$$

式中: σ_c 为煤的单轴抗压强度,MPa; μ_r 为摩擦因数,一般取为0.4; φ 为煤的内摩擦角,(°); r_0 为钻孔半径,m; γ 为岩体容重, N/m^3 ; H 为原始岩体垂深,m。

2 抽采钻孔漏气规律

2.1 抽采钻孔漏气通道分析

由于瓦斯抽采钻孔工艺复杂,封孔材料不同,现场环境变化大等因素,并结合钻孔周围的裂隙分布特征,分析瓦斯抽采钻孔的漏气通道主要存在以下4种形式。

1)漏气通道一:封孔材料本身漏气,如图4中绿色箭头所示。封孔材料千差万别,再加之封孔过程中的操作的差异,部分封孔材料膨胀硬化后,材料内部颗粒之间的孔隙增大,孔隙之间发生贯通,在抽采负压的作用下,外界空气容易从封孔材料的内部孔隙进入钻孔,形成漏气。

2)漏气通道二:钻孔周围的煤体漏气,如图4所示。钻孔形成后,钻孔周围裂隙发育并破碎,如果封孔材料不能有效地对破碎区的裂隙进行封堵,就会使外界空气在抽采负压作用下通过裂隙进入抽采钻孔。另外,抽采钻孔形成后,在矿山压力作用下,其轴向裂隙为卸压区、峰后应力集中区、峰前应力集中区和原始应力区,如果钻孔封孔长度太短,不能对卸压区和应力集中区的裂隙进行有效充填封堵,在抽采负压作用下,空气也会从煤体裂隙进入钻孔,造成抽采效果差。

3)漏气通道三:封孔材料与钻孔壁间隙漏气,如图5所示。钻孔封孔后,在矿山压力的作用下,钻孔发生变形。由于水泥、聚氨酯等封孔材料存在抗压强度低或充填材料本身的收缩等,在钻孔变形后,

封孔材料对钻孔不能形成有效的填充和支撑,在钻孔壁和封孔材料之间形成间隙,从而使得外界空气

在抽采负压作用下进入钻孔,产生漏气情况。

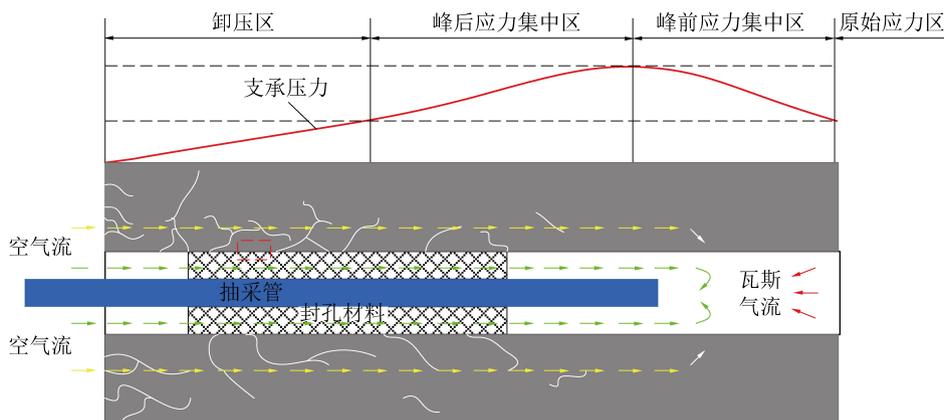


图4 抽采钻孔漏气通道示意

Fig.4 Schematic diagram of gas leakage channel of extraction borehole

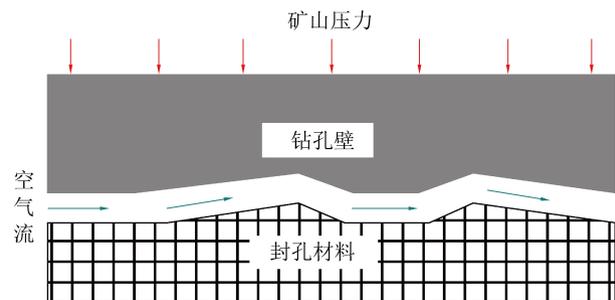


图5 封孔材料变形后与孔壁接触情况示意

Fig.5 Contact between sealing material and hole wall after deformation

4)漏气通道四:邻近钻孔影响漏气。当抽采钻孔孔深较大时,由于地质条件或设备原因,钻孔轨迹容易发生偏转,造成钻孔交叉贯通,或由于钻孔间距过近,使钻孔之间的破碎区贯通,造成当其中一个钻孔漏气时,邻近的钻孔也极易漏气,如图6所示。

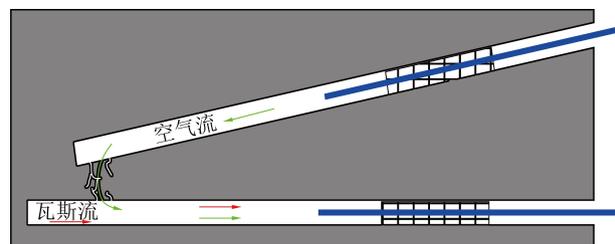


图6 邻近钻孔贯通漏气示意

Fig.6 Air leakage through adjacent boreholes

2.2 封孔原则

通过对抽采钻孔周围的应力和裂隙分析,得出抽采钻孔的漏风通道主要为:封孔材料本身、钻孔周围煤体、封孔材料与钻孔壁间隙以及邻近钻孔影响4种漏气通道。根据钻孔裂隙场及漏风通道,在抽采钻孔封孔中应做到以下2点。

1)堵实钻孔径向松动圈。封孔材料应具备渗

透性好,能够进入裂隙,对裂隙进行有效封堵充填。封孔材料应具备一定的抗压性能,避免在矿山压力作用下产生变形。封孔材料膨胀后,材料本身不收缩。

2)合理设计封孔长度。根据钻孔轴向裂隙分布特征可知,合理的封孔深度应该覆盖卸压区和峰后应力集中区,从而使封孔长度有效覆盖钻孔裂隙范围。

3 工程应用

3.1 工程概况

义煤集团孟津煤矿设计生产能力120万t/a,立井两水平上下山开拓,中央并列式通风,采用倾斜长壁采煤法。主采煤层2-1煤,属稳定煤层,煤层顶板为泥岩、中砂岩,底板为泥岩、砂质泥岩,煤层呈粉状产出,组织疏松。2-1煤属于突出煤层,实测瓦斯含量为 $6.97 \text{ m}^3/\text{t}$,瓦斯压力为 $0.3\sim 3.1 \text{ MPa}$ 。12030工作面标高 $-253\sim -320 \text{ m}$,走向长度125 m,倾斜长度550 m,煤层厚度2.8 m,煤层平均倾角为 4° 。

3.2 封孔工艺对比

3.2.1 原有封孔工艺抽采效果

孟津煤矿12030轨道巷瓦斯抽采钻孔原封孔工艺为:瓦斯抽采管采用 $2 \text{ m} \times \phi 50 \text{ mm}$ 的PVC管7根,其中实管5根、花管2根。封孔段采用聚氨酯封孔,封孔时将聚氨酯导入封孔带后快速送入钻孔,实现封孔,其中封孔深度10 m、封孔长度2 m。经过采集资料,统计了12030工作面轨道巷原抽采钻孔880、878、758和744号4个抽采钻孔的数据,如图7所示,抽采孔深均为65 m。

由图7可知,4个抽采钻孔瓦斯浓度变化规律较一致,基本呈指数形式变化,表现为抽采初始孔口

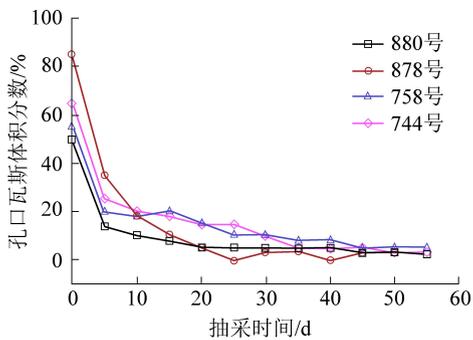


图7 原封孔工艺瓦斯浓度变化

Fig.7 Gas concentration change of original hole sealing technology 浓度较大,后期呈指数形式衰减。抽采初期,4个钻孔瓦斯体积分数分别为50%、85%、55%和90%,抽采时间达5 d时,4个抽采钻孔瓦斯体积分数均衰减至35%以下,抽采时间达55 d时,4个抽采钻孔孔口瓦斯体积分数均已降至5%以下。

抽采纯量变化规律和抽采浓度相似,呈指数衰减(图8)。监测钻孔抽采纯量为0.047、0.065、0.039、0.026 m^3/min ,20 d后基本衰减至0.003 m^3/min 左右并趋于稳定。所以,采用原有封孔工艺,并不能有效地对瓦斯进行抽采。

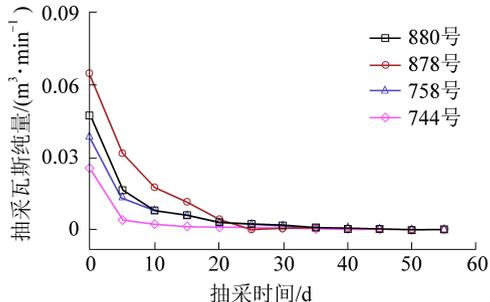


图8 原封孔工艺抽采纯量变化

Fig.8 Pure quantity of drainage of original hole sealing technology

3.2.2 封孔工艺优化

结合钻孔漏气规律及封孔原则,从封孔长度、封孔材料两方面对原封孔工艺进行优化。

1) 封孔深度优化。根据钻孔的应力分布特征,由图2可知,沿钻孔轴向分为卸压区、峰后应力集中区、峰前应力集中区和原始应力区。其中卸压区通常指巷道的松动圈,该区域煤体已发生破坏,裂隙发育。峰后应力集中区,煤体发生了强度破坏,产生大量裂隙,相互交叉,形成宏观裂隙。因此,封孔深度应覆盖卸压区和峰后应力集中区。

因此确定封孔深度前,首先要确定卸压区的范围,常用的方法有数值模拟、钻孔应力计、钻屑瓦斯解吸等方法。本次工业试验采用钻屑解吸指标判定测试卸压区范围^[20]。通过在12030工作面运输巷旁进行打钻,测得钻孔不同深度煤屑瓦斯解吸指标,

来确定卸压区范围,测试结果如图9所示。

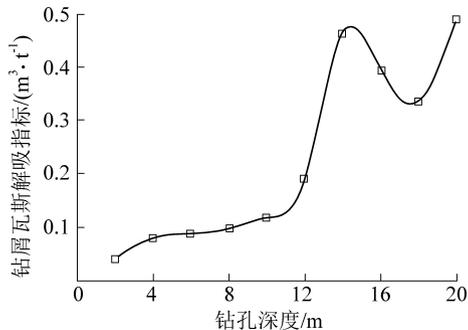


图9 钻孔不同深度钻屑瓦斯解吸指标

Fig.9 Analytical value of coal cuttings in different depth of borehole

由图9的变化曲线可知,随着钻孔深度的增加,钻屑瓦斯解吸指标不断变大,但在11 m处出现拐点,拐点后瓦斯解吸指标开始大幅度增长,据此可判定卸压区的范围为11 m,所以原封孔深度10 m,无法覆盖卸压区。因此12030运输巷封孔深度应大于11 m。

支撑压力峰后应力区可根据三角关系得出,一般煤巷两帮应力集中系数不超过2,此时峰后应力集中区范围等于卸压区范围,所以将12030运输巷抽采钻孔合理的封孔深度确定为20 m。

2) 钻孔破碎区封堵。根据12030工作面抽采钻孔实际情况,按式(1)分别取 $r_0=0.0445\text{ m}$ 、 $\varphi=30^\circ$ 、 $H=800\text{ m}$ 、 $\sigma_c=2.25\text{ MPa}$ 、 $\gamma=2.5\text{ kN/m}^3$ 可得出钻孔卸压直径为0.102 m,考虑到孟津煤矿煤体强度较低,所以卸压区直径会较计算值更大。由于聚氨酯渗入煤体裂隙效果较差,无法对钻孔周围的卸压区进行有效封堵,因此,采用两堵一注,注浆段采用自制的SRS-II高强微膨胀型快速凝固封孔材料,该材料由A、B两种组分按比例混合组成,其黏合力高、渗透性高、机械性能好,凝固后强度高且使用寿命长,可与被填充空间周围的岩壁产生高强度黏合。该封孔材料可渗入到煤体裂隙中,产生胶凝、膨胀、聚合、硬化,对裂隙起到有效封堵作用^[21]。优化后的封孔工艺如图10所示。

3.2.3 封孔工艺优化后抽采效果

现场在运输巷选择992、855、826和756号钻孔进行工业试验,采用全程注浆工艺封孔,试验结果如图11所示。

初始孔口瓦斯抽采体积分数分别为95%、90%、65%和95%,抽采时间30 d时,孔口瓦斯体积分数分别为80%、35%、35%和30%;在抽采时间达50 d时,孔口瓦斯体积分数分别为32%、30%、30%和30%,较30 d时的抽采浓度并无明显衰减。

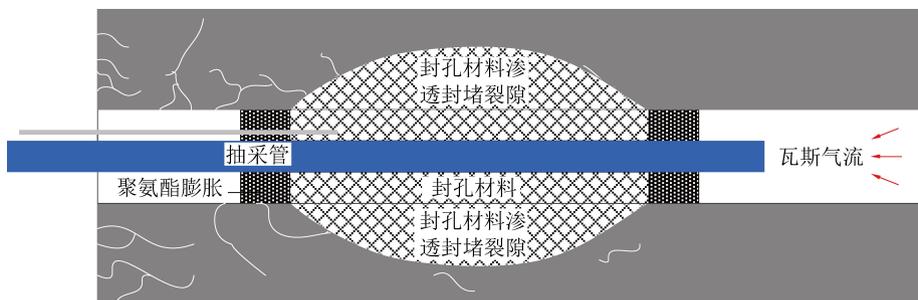


图10 优化后封孔示意

Fig.10 Sealing after optimization

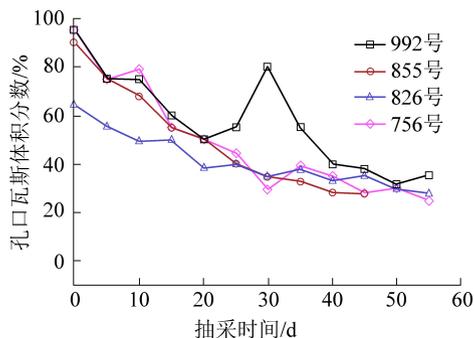


图11 封孔工艺优化后抽采浓度

Fig.11 Extraction concentration after optimization of sealing technology

抽采纯量变化规律和抽采浓度相似(图12)。监测钻孔抽采纯量分别为0.042、0.018、0.026、0.047 m^3/min , 20 d后基本衰减至0.008 m^3/min 左右,并逐渐趋于稳定。

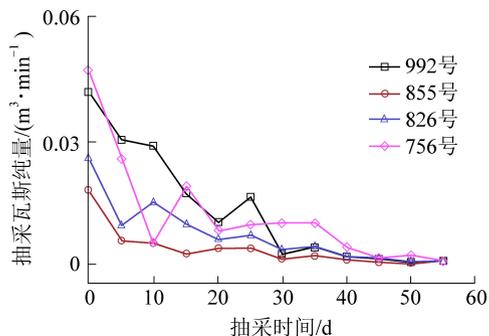


图12 封孔工艺优化后抽采瓦斯纯量

Fig.12 Pure quantity of drainage after optimization of sealing technology

因此,通过封孔优化前后的跟踪监测抽采数据对比分析,原封孔工艺较封孔优化后的瓦斯抽采体积分数和抽采纯量有明显下降。封孔优化后的抽采体积分数为原封孔瓦斯抽采体积分数的1.1~1.9倍,优化后的抽采纯量为原封孔工艺的2.6倍左右。所以优化后的封孔工艺较原封孔工艺在瓦斯抽采效果上有了明显提高。

4 结 论

1) 根据矿山压力理论,分别从钻口轴向和径向分析了裂隙的分布规律,提出了抽采钻孔的4种漏气通道分别为:封孔材料本身漏气、钻孔周围的煤体漏气、封孔材料与钻孔壁间隙漏气和邻近钻孔影响漏气。

2) 根据抽采钻孔周围的应力和裂隙分布,基于4种漏气通道形式,提出堵实钻孔径向松动圈和设计合理的封孔长度的封孔原则。

3) 根据孟津煤矿实际地质条件,优化了封孔工艺,提出两堵一注全程注浆封孔工艺,封孔浆液采用自制的SRS-II高强度微膨胀型快速凝固封孔材料,封孔优化后的瓦斯抽采体积分数为原封孔瓦斯抽采体积分数的1.1~1.9倍,优化后的抽采纯量为原封孔工艺的2.6倍左右,优化后的封孔工艺取得了良好的抽采效果。

参考文献 (References):

- [1] 王刚,杨曙光,张寿平,等.新疆煤矿区瓦斯抽采利用技术现状及展望[J].煤炭科学技术,2020,48(3):154-161.
WANG Gang, YANG Shuguang, ZHANG Shouping, et al. Status and prospect of coal mine gas drainage and utilization technology in Xinjiang Coal Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 154-161.
- [2] 程健维,赵刚,刘雨涛,等.瓦斯抽采钻孔非凝固材料性能与智能封孔装置研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):131-135.
CHENG Jianwei, ZHAO Gang, LIU Yutao, et al. Study on the properties of non-solidified materials and intelligent hole sealing device for gas drainage drilling [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 131-135.
- [3] 章光,吴金刚,杨龙杰.非等压应力场上向长距离穿层瓦斯抽采钻孔密封长度研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3422-3431.
ZHANG Guang, WU Jingang, YANG Longjie. Determination of the sealing length of upward long crossing boreholes for gas drainage under unequal stress fields [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3422-3431.

- [4] 王超,张雷林,翟文杰,等.五轮山煤矿瓦斯抽采钻孔封孔工艺优化研究[J].煤炭技术,2019,38(5):99-101.
WANG Chao,ZHANG Leilin,ZHAI Wenjie,*et al.* Study on optimization of gas drainage borehole sealing technology in Wulunshan coal mine [J].Coal Technology,2019,38(5):99-101.
- [5] 齐庆杰,赵允信,吕有厂,等.瓦斯抽采“两堵一注一排”新工艺技术[J].中国安全科学学报,2018,28(8):100-104.
QI Qingjie,ZHAO Youxin,LYU Youchang,*et al.* Study on new technology of “two plugging, one injection and one discharge” [J]. China Safety Science Journal,2018,28(8):100-104.
- [6] 张福旺,范付恒,秦汝祥.囊袋式两堵一注封孔装置在顺层钻孔瓦斯抽采中的应用[J].煤炭工程,2013,45(11):57-59.
ZHANG Fuwang,FAN Fuheng,QIN Ruxiang. The application of two injection sealing devices in the hole gas extraction in the bedding [J]. Coal Engineering,2013,45(11):57-59.
- [7] 王振锋,周英,孙玉宁,等.新型瓦斯抽采钻孔注浆封孔方法及封堵机理[J].煤炭学报,2015,40(3):588-595.
WANG Zhenfeng,ZHOU Ying,SUN Yuning,*et al.* Novel gas extraction borehole grouting sealing method and sealing mechanism [J].Journal of China Coal Society,2015,40(3):588-595.
- [8] 吴水平.囊袋式注浆封孔法在煤矿瓦斯抽采封孔中的应用[J].中国煤炭,2010,36(6):98-99,103.
WU Shuiping. Application of bag type grouting for hole sealing in sealing of coal mine gas extraction holes [J].China Coal,2010,36(6):98-99,103.
- [9] 乔元栋,程虹铭.基于COMSOL的顺层抽采钻孔漏气通及带压封孔技术研究[J].煤炭工程,2019,51(7):114-119.
QIAO Yuandong,CHENG Hongming. Research on leakage channel and pressurized hole sealing technology for bedding drainage hole based on COMSOL [J]. Coal Engineering,2019,51(7):114-119.
- [10] 王永龙,王振锋,孙玉宁,等.煤壁应力峰值动态移动诱发封孔漏气机理研究[J].安全与环境学报,2016,16(5):129-134.
WANG Yonglong,WANG Zhenfeng,SUN Yuning,*et al.* On the mechanism of sealing leakage due to the stress peak dynamic displacement in front of the coal workface [J]. Journal of Safety and Environment,2016,16(5):129-134.
- [11] 胡胜勇,刘红威.煤层瓦斯抽采钻孔漏气机理及应用研究进展[J].煤矿安全,2016,47(5):170-173.
HU Shengyong,LIU Hongwei. Leakage mechanism of coal seam gas drainage borehole and its application research progress [J]. Safety in Coal Mines,2016,47(5):170-173.
- [12] 周福宝,孙玉宁,李海鉴,等.煤层瓦斯抽采钻孔密封理论模型与工程技术研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(3):433-439.
ZHOU Fubao,SUN Yuning,LI Haijian,*et al.* Research on the theoretical model and engineering technology of the coal seam gas drainage hole sealing [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2016,45(3):433-439.
- [13] 王宁,张天军,范京道,等.煤矿瓦斯抽采封孔质量检测技术与应用[J].煤炭技术,2019,38(8):87-89.
WANG Ning,ZHANG Tianjun,FAN Jingdao,*et al.* Testing technology and application of sealing hole quality in coal mine gas extraction [J]. Coal Technology,2019,38(8):87-89.
- [14] 王志明,孙玉宁,王永龙,等.瓦斯抽采钻孔动态漏气圈特性及漏气处置研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(5):139-145.
WANG Zhiming,SUN Yuning,WANG Yonglong,*et al.* Study on characteristics of dynamic leakage ring and leakage disposal of gas extraction borehole [J]. Journal of Safety Science and Technology,2016,12(5):139-145.
- [15] 郭平.瓦斯抽采钻孔漏气模型及封孔工艺优化研究[J].煤炭技术,2020,39(6):82-85.
GUO Ping. Gas leakage model and optimization of sealing technology in gas drainage [J]. Coal Technology,2020,39(6):82-85.
- [16] 周厚权,申凯,陈宾.瓦斯抽采钻孔漏气类型划分与高效封孔技术应用研究[J].矿业安全与环保,2019,46(1):33-36,42.
ZHOU Houquan,SHEN Kai,CHEN Bin. Research on leakage types and efficient sealing technology for gas drainage borehole [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2019,46(1):33-36,42.
- [17] 韩泽鹏,窦林名,王正义,等.动静载影响下大倾角工作面巷道两帮应力分布规律研究[J].煤炭科学技术,2019,47(9):183-188.
HAN Zepeng,DOU Linming,WANG Zhengyi,*et al.* Research on stress distribution law of two ribs in large dip angle working face under influence of dynamic and static loads [J]. Coal Science and Technology,2019,47(9):183-188.
- [18] 冯友良.煤巷围岩应力分布特征及帮部破坏机理研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):183-191.
FENG Youliang. Study on surrounding rock stress distribution characteristics and sidewall failure mechanism of seam gateway [J]. Coal Science and Technology,2018,46(1):183-191.
- [19] 刘畅,李宇星,覃敏.基于三维地应力实测的巷道稳定性优化研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1372-1380.
LIU Chang,LI Yuxing,QIN Min. Study on drift stability optimization based on 3D geo-stress measurement [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(5):1372-1380.
- [20] 范彦阳,陈文岗,季卫斌.李雅庄矿本煤层瓦斯预抽钻孔布置参数研究[J].煤炭技术,2014,33(12):168-172.
FAN Yanyang,CHEN Wengang,JI Weibin. Study layout parameters of coal-seam gas pre-pumping drilling in Liyazhuang Mine [J].Coal Technology,2014,33(12):168-172.
- [21] 潘荣锬,程远平,董骏,等.不同加卸载下层理裂隙煤体的渗透特性研究[J].煤炭学报,2014,39(3):473-477.
PAN Rongkun,CHENG Yuanping,DONG Jun,*et al.* Research on permeability characteristics of layered natural coal under different loading and unloading [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(3):473-477.