

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0315-07

回采工作面上隅角瓦斯拖管抽采技术参数研究

吴兵, 雷柏伟, 华明国, 管海鹤, 赵志研

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要 针对传统埋管抽放上隅角瓦斯技术中抽放点在空间位置不连续抽放效果差、管材浪费严重、抽放成本高等重大缺陷, 提出了上隅角瓦斯拖管抽采技术, 可使抽放点匹配工作面推进速度, 实现了采空区瓦斯抽放最佳效果的连续性, 并且能回收管材降低抽放成本。采空区瓦斯抽放最佳位置的选择即抽放参数的确定是成功实现上隅角瓦斯拖管抽放的关键。利用 Brinkman 方程、菲克扩散定律和瓦斯扩散平移方程来描述瓦斯的流动扩散行为, 建立工作面瓦斯流动多物理场耦合模型, 并利用 Fluent 对模型进行求解, 从而确定拖管抽放最佳布置参数, 并对其进行实际应用和效果测试。结果表明: 数值模拟和现场测试结果基本一致, 最终确定了最佳抽放点位置为距离底板 2.4 m、沿倾斜方向距离回风巷道 1.57 m、沿走向深入采空区 17.4 m 处; 应用期间杜绝了上隅角瓦斯超限, 上隅角瓦斯拖管抽采技术具有较好的适用性和可行性。

关键词 上隅角; 拖管抽采技术; 耦合模型; Fluent

中图分类号 TD 712

文献标志码 A

Parameters of gas tube extraction technology in the upper corner of working face

WU Bing, LEI Baiwei, HUA Mingguo, GUAN Haihe, ZHAO Zhiyan

(School of Resources & Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract In view of the bad extraction effect for discontinuous space position of extraction point, serious waste of pipe and high extraction cost in the traditional buried tube gas extraction technology in upper corner of working face, the gas tube extraction technology in the upper corner was introduced in this paper, which can make the extraction point matching the face advancing speed, realize the continuity of the best goaf gas extraction effect, recover pipes and materials, and reduce the extraction cost. The selection of optimal location of goaf gas extraction, namely the determination of extraction parameters, is the successful implementation of gas tube extraction of the upper corner. The behavior of gas diffusion and flow were described by using Brinkman equation, Fick diffusion law and gas diffusion translation equation, and the multi-physical field coupling model of gas flow in working face was established. Then, the optimal layout parameters of the tube extraction were determined by Fluent calculation of the model, and was applied to the practice and effect test. The results show that the numerical simulations are basically in accordance with the field test results, and the optimum extraction position has been determined as 2.4 m from the floor, 1.57 m from the air-return roadway along the inclined direction, and 17.4 m deep into the goaf along the strike. Gas overrun in the upper corner has been eliminated during

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274205)

作者简介: 吴兵(1967-), 男, 山西省阳泉市人, 教授, 博士生导师, 从事火灾及瓦斯灾害防治方面的研究。

E-mail: wbelcy@vip.sina.com

Tel: 18601146558

the application, which proves that the gas tube extraction technology in the upper corner has a good applicability and feasibility.

Key words upper corner; tube extraction technology; coupling model; Fluent

由于综放开采强度大,残存在采空区的遗煤很多,使得采空区涌出的瓦斯量增多,导致上隅角和工作面回风巷的瓦斯经常超限,瓦斯灾害事故发生的几率大大增加,严重威胁矿井的安全生产。因此,对采空区及上隅角瓦斯的治理尤为重要。进行采空区瓦斯抽放是治理上隅角瓦斯积聚的主要方法之一,现今常用的抽放方法是埋管抽放。埋管抽放方法即在工作面的回风侧采空区埋设 1 条瓦斯抽放管路,当管路埋入采空区一定长度后开始抽放,同时埋入第 2 条抽放管路,当第 1 条瓦斯抽放管口进入采空区瓦斯涌出带和过渡带的交界部位时停止抽放,开始第 2 条管路抽放,并重新铺设新的管路,如此循环交替,直至工作面回采完毕。随着工作面的推进抽放口位置将会不断改变并偏离原有设计位置,抽放效果有可能无法达到要求,同时这种埋管方法需要每隔一定的步距(根据现场情况确定)重新铺设 1 趟抽放管路,需要大量的人力、物力进行抽放管路的加工、运输和安装,同时瓦斯抽放管路不能回收,造成极大的经济损失。因此,有必要对传统埋管抽采工艺进行技术革新。而采空区瓦斯抽放最佳位置的选择即抽放参数的确定是成功实现上隅角瓦斯拖管抽放的关键。利用数值模拟和现场测试 2 种方法确定其抽采参数,并在实际现场进行了应用,这对于解决上隅角瓦斯超限问题和保障工作面安全生产具有重要的实际意义,同时回收抽放管材,有着极大的经济和社会效益。

1 上隅角瓦斯拖管抽采技术理论分析

根据采空区气体流场和瓦斯浓度的一般分布规律可将采空区瓦斯流动大体划分为 3 个带^[1],即涌出带(距工作面 0~30 m)、过渡带(距工作面 30~90 m)和滞留带(距工作面 90 m 以外),根据实际情况“带宽”略有差异。经现场实测,常村煤矿 N3-8 工作面采空区三带瓦斯涌出情况和瓦斯浓度分布情况见图 1。从图 1 可以看出,在涌出带中,采空区遗煤和邻近层卸压瓦斯向采空区排放,进入涌出带的瓦斯流动速度较快,多以层流形式存在,且这部分瓦斯几乎全部被采空区的漏风流携带到工作面,瓦斯涌出量较多,从而导致工作面上隅角的瓦斯体积分数增大。另外漏风大小与工作面供风量大小及

支架位置和工作面通风方式有关。随着工作面的推进,采空区进入过渡带,过渡带的瓦斯在工作面和采空区的压差作用下,一部分进入工作面,一部分暂时或永远滞留在采空区内,该区域瓦斯流动速度明显下降,瓦斯体积分数相对较高,流动呈现不平衡性,处于层流、紊流交错阶段,而进入滞留带内的采空区瓦斯一般滞留在采空区的深部,流动速度较低,瓦斯体积分数也比前两带要高。上述 3 个带不是固定不变的,随着工作面的推进而向前移动,采空区瓦斯涌出三带出现“浪涌”现象。

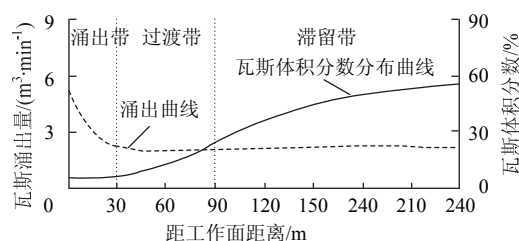


图 1 常村煤矿 N3-8 工作面采空区瓦斯涌出规律示意图
Fig.1 Gas emission regularity schematic diagram of N3-8 working face of Changcun coal mine

因此,控制工作面回风侧的采空区瓦斯涌出带的瓦斯涌出量是治理上隅角瓦斯的关键,埋管抽放正是利用了这点,通过布置管路在采空区涌出带进行负压抽放而成为目前有效治理上隅角瓦斯的主要方法之一。但是埋管抽放上隅角瓦斯存在重大缺陷:

1) 管路抽放口在空间上存在间隔。随着工作面的推进,采空区“三带”也随之移动,而埋管抽放口是固定不变的,抽放口位置将会不断改变并偏离原有设计位置,无法保持抽采点在空间上的连续性,无法达到预期效果,见图 2a。

2) 采空区遗弃大量抽采管路,管材不能回收,资源浪费严重,投入成本大。

上隅角瓦斯移动式抽采技术是通过动力装置和牵引装置按照一定速度逐渐将瓦斯管从采空区拖出,使之匹配工作面的推进速度,保持抽放口位置始终处于设计位置(最佳抽放点,经研究测试确定),如图 2b 所示。上隅角移动式抽采工艺从根本上解决传统埋管抽采方式中的两大缺陷,保持管路抽放点处于空间上最佳抽采位置的连续性,发挥最

佳抽采效果,同时能回收抽采管材,有着极大的经济和社会效益。

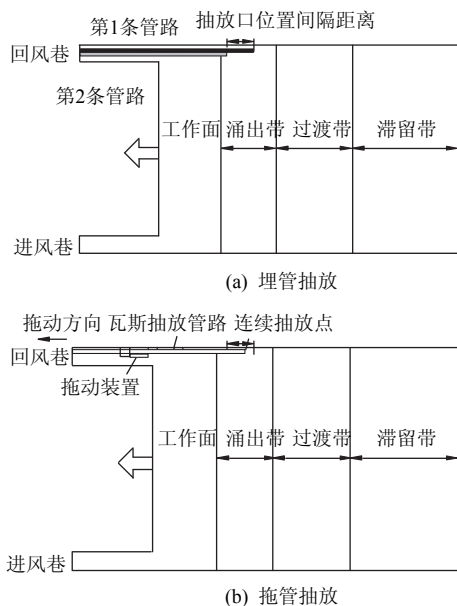


图2 上隅角瓦斯埋管抽放和拖管抽放示意图
Fig.2 Schematic diagram of buried tube drainage and drag tube drainage of gas in upper corner

2 工作面瓦斯涌出及其移动规律的数值模型

由于工作面采空区瓦斯涌出量大易造成上隅角瓦斯超限,掌握工作面的瓦斯压力分布和涌出规律对有效治理瓦斯具有重要意义。而林柏泉提出的“煤层瓦斯运移数学模型”为研究煤层瓦斯运移、压力分布和瓦斯涌出规律提供了理论基础^[2-3]。由于综放工作面的瓦斯流动是一个非常复杂的过程,为了更好地接近实际,更准确地对采煤工作面进行描述,针对采煤工作面和采空区瓦斯移动特性的差异并根据瓦斯的扩散特性建立瓦斯运移模型,利用 Fluent 软件耦合计算非线性方程的高效性,对模型进行数值解算。

2.1 工作面气体流动模型

2.1.1 工作面气体流动控制方程

工作面通风(包括进、回风巷通风)可以视为管道湍流流动,而管道内流体的流动规律可以很好地用 Navier-Stokes 方程来描述和求解,因此可以将 Navier-Stokes 方程作为工作面气体流动控制方程:

$$-\nabla \cdot \eta (\nabla u_{ns} + (\nabla u_{ns})^T) + \rho u_{ns} \cdot \nabla u_{ns} + \nabla p_{ns} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u_{ns} = 0 \quad (2)$$

式中: η 为黏性系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; u 为速度矢量, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; p 为压力; 速度矢量(u)和

压力(p)分别为 Navier-Stokes 方程因变量,并且用下标“ns”来表示。

2.1.2 采空区气体流动方程

由于采空区存在大量的孔隙和裂缝,可以将采空区气体流动规律看做是介于 Navier-Stokes 管道流动和达西渗流之间的一种过渡流动,而描述孔隙介质中流体快速流动的 Brinkman 方程正好适用于采空区。本文引入 Brinkman 方程来描述采空区孔隙介质中的空气流动规律^[4-5]:

$$-\nabla \cdot \frac{\eta}{\varepsilon} (\nabla u_{br} + (\nabla u_{br})^T) - \left(\frac{\eta}{\varepsilon} u_{br} + \nabla p_{br} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: ε 为孔隙率; 速度矢量 u_{br} 和压力 p_{br} 为 Brinkman 方程的因变量。

2.1.3 气体流动模型

由于 Navier-Stokes 方程能很好地描述井下巷道气体流动,而 Brinkman 方程比较适合描述采空区垮落带渗流的空气流动,利用 Navier-Stokes 方程和 Brinkman 方程来构建回采工作面的气体流动模型(图3),把方程(1)和(3)进行联立并求解,通过解算模型能够得到气体流动在平衡状态下的速度场和压力场分布情况,即得到工作面及采空区气体流动速度和压力分布情况^[6-7]。Navier-Stokes 模型与 Brinkman 流动区域的速度和压力在边界上是一致的,即 $u_{ns} = u_{br}$, $p_{ns} = p_{br}$,这说明在漏风界面上,工作面速度和压力和采空区是保持一致的,即漏风面为连续面。Navier-Stokes 模型边界条件为:巷道壁上的气体速度为 0 并且对应无滑移边界条件,已知进风巷风量和回风巷道的出口压力。

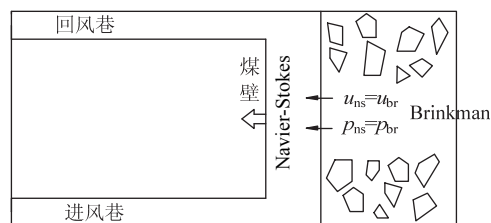


图3 气体流动模型

Fig.3 Air flow model

2.2 煤壁和采空区瓦斯的扩散运移模型

采场中的瓦斯运移遵循流体的动力弥散定律,煤屑里瓦斯的运动基本上符合线性扩散定律(菲克定律)^[8-9],仅利用 Darcy 定律是不能够完全反映出瓦斯扩散运移规律的,可以用平移-扩散方程来描述瓦斯在流场中的扩散运移规律:

$$\theta_s \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\theta_s D_L \nabla c + uc) = S_c \quad (4)$$

式中: θ_s 为瓦斯体积率; D_L 为压力扩散张量, m^2/d ; c 为瓦斯溶解体积分数, kg/m^3 ; S_c 为多孔介质中的瓦斯在单位时间和单位体积内的增加量(瓦斯的相对涌出速度)。

采场中瓦斯在扩散还未达到稳定状态前随时间和空间而变化的关系遵守菲克扩散定理^[10-11]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial t^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (5)$$

式中: r 为极坐标半径; D 为扩散系数。

通过气体流动模型中的速度场和压力场对瓦斯进行扩散(式(4)), 因为瓦斯具有升浮扩散的性质(式(5)), 通过平移-扩散方程和菲克扩散定理来建立瓦斯扩散模型(图 4)。在瓦斯参与下, 采煤工作面与采空区的流场达到新的平衡, 这是一个流体流动和溶质(瓦斯是溶质的一种)的运输、扩散的多物理场耦合过程。通过 Fluent 将空气流动模型(图 3)和瓦斯扩散模型(图 4)进行联立并求解^[12-13], 可以模拟出采空区瓦斯涌出并扩散到采煤工作面的过程, 并得到瓦斯运移过程中工作面和采空区各点的空气流动速度、瓦斯体积分数和压力分布情况。

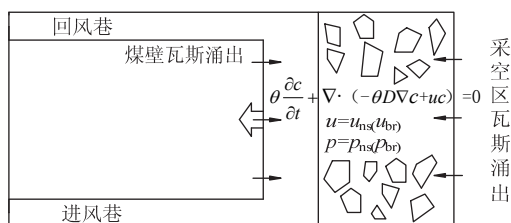


图 4 煤壁和采空区瓦斯的扩散模型

Fig.4 Gas in goaf and workface diffusion model

2.3 模型数值解算

如图 3,4 所示,进、回风巷进行了 Navier-Stokes 流动, 部分工作面漏风进入采空区后逐渐变为 Brinkman 流动, 流体密度和黏度假定都是常数, 流动是稳态过程, 进入采空区的流量和流出采空区的压力为已知条件。工作面与采空区的气体流场在瓦斯参与下达到新的平衡状态, 这是一个流体流动和溶质传输、扩散的多物理场耦合过程。利用 Fluent 对空气流动模型(图 3)和瓦斯扩散模型(图 2)联立进行稳态非线性的求解, 分别求出无拖管抽放时、拖管抽放位置在采空区内不同位置时工作面和采空区瓦斯体积分数分布。

3 Fluent 数值解算及分析

3.1 工程条件

实验场地 N3-8 工作面主采 3[#]煤, 煤层平均厚

度 6 m, 工作面走向长度 680 m, 倾向长度 120 m, 倾角 0°~3°, 工作面宽度 6 m, 运输巷净断面 4.2 m×2.9 m, 回风巷净断面 4.0 m×2.8 m, 工作面采用 U 型通风方式, 进风巷风量 1 800 m³/min, 风速为 2.5 m/s, 经现场测定, 工作面总涌出量为 10 m³/min, 煤壁瓦斯涌出 2.3 m³/min, 落煤(包括遗煤)瓦斯涌出 2.8 m³/min, 采空区瓦斯涌出 4.9 m³/min。

3.2 未抽放采空区瓦斯体积分数分布模拟结果分析

未采取抽放措施下对采空区瓦斯运移进行数值模拟, 其结果如图 5 所示。由图中可以看出采空区瓦斯体积分数沿走向方向随深度的增加而逐渐增大, 沿倾斜方向靠近进风巷一侧较低, 越靠近回风巷体积分数越高, 竖直方向上瓦斯体积分数随高度的增加而增大, 底板处到冒落带的瓦斯体积分数增幅较快, 裂隙带的瓦斯体积分数变化趋于稳定。在一定范围内增加工作面风量可以降低工作面瓦斯体积分数, 但受现场条件、设备及运营成本和风速的限制, 风量不可能无限增大^[14], 所以在单靠风排不能解决瓦斯超限问题的情况下, 必须采取有效的抽放措施。

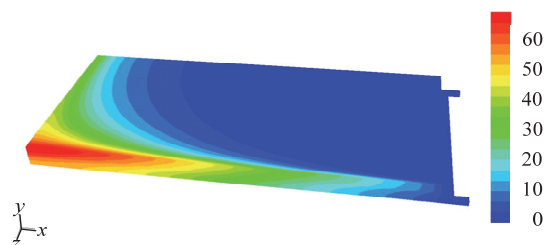


图 5 未采取抽放措施的采空区瓦斯体积分数分布云图(%)

Fig.5 Nephogram of gas concentrations distribution in goaf without drainage measure

3.3 上隅角拖管抽放采空区瓦斯数值模拟结果及分析

为了确定上隅角瓦斯拖管抽放的合理参数, 根据 N3-8 工作面现场实际情况, 决定在回风巷距离底板 0.6~2.4 m 的高度进行数值模拟; 沿煤层倾向对距离回风巷外帮 0.8~3.2 m 的位置进行数值模拟; 沿走向方向取抽放管进入采空区深度 3~30 m 的位置进行数值模拟, 抽放管路负压为 2 kPa。取距离工作面底板高度 2 m, 距回风巷外帮 0.5 m, 采空区纵深 1 m 的位置作为上隅角瓦斯体积分数监测点, 记录不同抽放参数下的上隅角瓦斯体积分数变化情况, 抽放效果见图 6~8。

从图 6 可看出, 抽放体积分数随着抽放管距底

板垂直高度的增大而增大,这与瓦斯的升浮特性相符,但是由于现场条件限制不可能无限地将抽放管抬高,根据现场上隅角处顶板垮落情况将最佳抽放高度定为 2.4 m;图 7 中显示抽放管在距离回风巷 1.6 m 时达到抽放体积分数的最大值 18%,此时上隅角瓦斯体积分数降到 1.7%,随着距离增大,抽放效果变差;从图 8 可看出,抽放体积分数随着抽放管进入采空区深度的增大而增大,当抽采深度达到 15 m 时上隅角瓦斯体积分数降到最低值 1.3%,之后虽然抽放体积分数一直在升高,但是上隅角治理效果变差,这是由于随着采空区的深入瓦斯体积分数逐渐变高,抽放体积分数也变大,但是由于抽放口远离上隅角位置,对上隅角瓦斯影响较小。

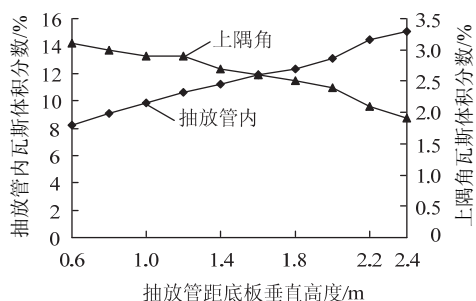


图6 不同抽采高度的抽采效果

Fig.6 The effect of gas drainage in different height

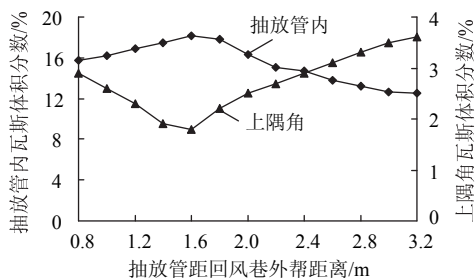


图7 沿煤层倾向不同距离的上隅角抽采效果

Fig.7 The effect of gas drainage in different distance

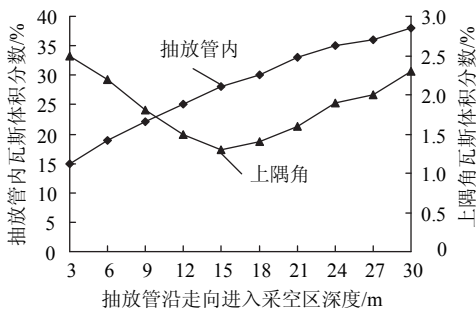


图8 沿走向不同抽采深度的上隅角瓦斯抽采效果

Fig.8 The effect of gas drainage in different depth

综上所述,确定了上隅角瓦斯拖管抽采的最佳抽放位置为距离底板 2.4 m、沿倾斜方向距离回风

巷道 1.6 m、沿走向深入采空区 15 m 处,抽放后上隅角瓦斯体积分数降低至 1.0%,抽放效果如图 9。

3.4 上隅角封堵拖管抽放采空区瓦斯数值模拟结果及分析

根据数值模拟结果,工作面上隅角采取了拖管抽放采空区瓦斯的措施后,上隅角瓦斯体积分数降低到了 1.2%,但上隅角瓦斯体积分数有时依然超限,分析原因可能为上隅角的空间是一个半开放空间(通常称“三角区”)^[15],抽放管卸压严重,从而造成瓦斯抽放效果不理想,所以有必要对上隅角进行适当的封堵,以提高抽放效率并进一步降低上隅角瓦斯体积分数。

根据常村煤矿 N3-8 工作面现场实际情况,上隅角区域采用装满矸石的麻袋垛成的密闭墙进行封堵,从而在上隅角形成一个相对密闭的空间,瓦斯能够集聚,从而有利于抽放。在数值模拟过程中,将上隅角封堵的密闭墙可以近似看做一个长 2 m、厚 1 m、高 1.8 m 的实体,实体为多孔介质,孔隙率取 0.5%,黏性系数取 5 000 Pa·s,模拟后的工作面瓦斯抽放效果如图 10 所示。模拟结果显示,上隅角采用封堵措施后,抽放管路内瓦斯体积分数可达到 31%,上隅角瓦斯体积分数降到了 0.6%。

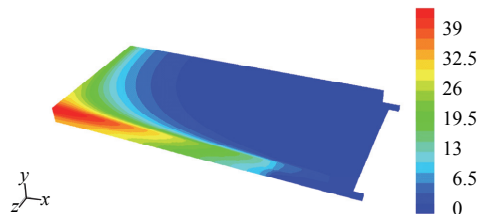


图9 抽放效果最好的采空区体积分数分布云图(%)

Fig.9 Nephogram of gas concentrations distribution in goaf with the best drainage effect

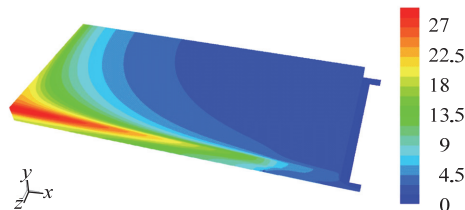


图10 上隅角采用封堵措施后的采空区瓦斯体积分数分布云图(%)

Fig.10 Nephogram of gas concentrations distribution in goaf using plugging measure in upper corner

4 现场应用情况

4.1 现场试验

以常村煤矿 N3-8 工作面为试验地点,在回风

巷上隅角位置铺设 1 趟瓦斯管路进行拖管抽采, 管径 150 mm, 铺设位置如图 11 所示。

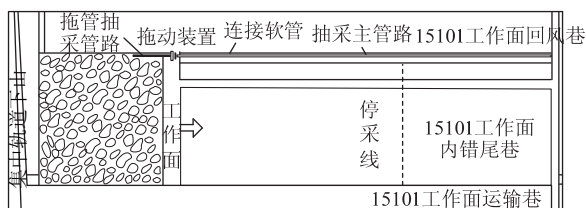


图 11 拖管抽采最佳抽放位置测试地点位置图

Fig.11 Test location of the optimum tube extraction position

瓦斯抽采管路接入抽采系统, 负压控制在 2 kPa, 在上隅角位置(取距离工作面底板高度 2 m、距回风巷外帮 0.5 m、采空区纵深 1 m 的位置)安装瓦斯监控探头, 记录上隅角瓦斯体积分数变化情况, 随着工作面推进, 分别进行 3 次测试, 分别考察抽放口距底板不同高度时、距回风巷外帮不同距离、进入采空区不同深度时上隅角瓦斯体积分数变化情况, 实际测试结果表现为离散点, 进行数据拟合, 拟合结果见图 12~14。

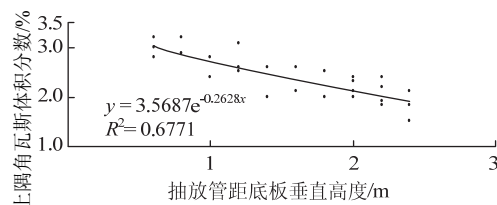


图 12 抽放管在不同高度时上隅角瓦斯体积分数拟合曲线
Fig.12 Fitting curve of gas concentration in upper corner with drainage pipe at different heights

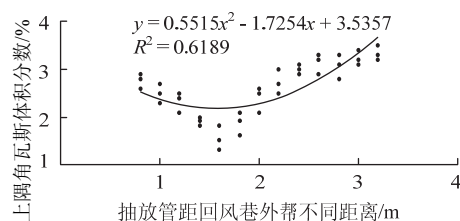


图 13 抽放管距回风巷外帮不同距离时上隅角瓦斯体积分数拟合曲线

Fig.13 Fitting curve of gas concentration in upper corner with drainage pipe in different distance from air-return roadway

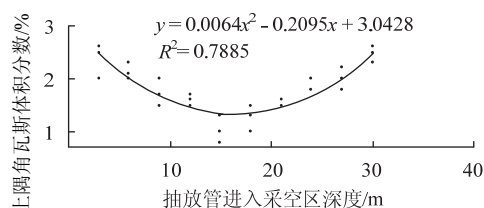


图 14 抽放管进入采空区不同深度时上隅角瓦斯体积分数拟合曲线

Fig.14 Fitting curve of gas concentration in upper corner with drainage pipe in different deep along the goaf

从图 12 看出, 上隅角瓦斯体积分数与抽放高度存在指数关系: $y=3.568e^{-0.26x}$, 即拖管抽采口位置距离底板越高, 治理上隅角瓦斯积聚效果越明显; 图 13 说明抽采口沿煤层倾向距回风巷的距离与上隅角瓦斯体积分数呈二次曲线关系: $y=0.551x^2-1.725x+3.535$ 可得出在距回风巷外帮 1.57 m 的位置为涌出瓦斯较多的漏风口; 从图 14 可看出抽采口在采空区中的位置与上隅角瓦斯体积分数关系为: $y=0.006x^2-0.209x+3.042$, 这是由于刚开始抽放口处于瓦斯涌出带与工作面的邻近区域, 对上隅角漏风流和瓦斯流场影响较大, 随着抽采管路的深入, 距离涌出带和过渡带的分界线越来越近, 离上隅角区域越来越远, 上隅角瓦斯治理效果越来越差。

现场测试确定了上隅角瓦斯拖管抽采的最佳抽放位置为距离底板 2.4 m、距回风巷外帮 1.57 m、沿走向深入采空区 17.4 m 处, 与模拟结果基本一致(高 2.4 m, 倾向 1.5 m, 深 15 m), 由于现场实际瓦斯涌出和分布受顶板来压、工作面推进度等因素的影响, 所以两者结果之间存在一定的差异。

4.2 现场应用效果

潞安集团常村煤矿 N3-8 工作面由于采空区瓦斯涌出较大上隅角瓦斯体积分数较高(达到 4.2%), 超限现象时有发生, 后采用了埋管抽放也未能有效解决。根据上述数值模拟和现场测试最终确定上隅角瓦斯拖管抽放参数为: 抽放管位置距底板高 2.4 m, 沿倾向 1.57 m, 深入采空区 17.4 m。图 15 为 2012 年 8 月 15 日至 11 月 25 日期间拖管抽放效果, 从图中可看出采用上隅角瓦斯拖管抽采技术治理上隅角瓦斯效果明显, 杜绝了上隅角瓦斯超限, 保证了回采工作面的安全生产, 同时节省大量抽放管材, 减少了抽放成本, 取得较好经济和社会效益。

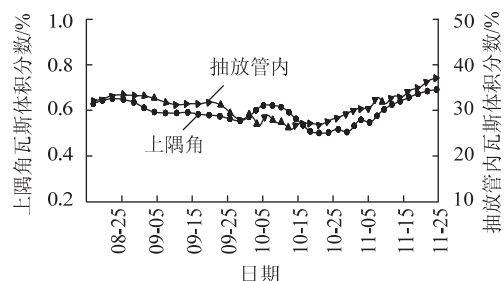


图 15 采用上隅角瓦斯拖管抽采技术现场实测效果
Fig.15 Measured results in field of the gas concentrations using gas tube extraction technology in upper corner

5 结 论

1) 引入 Brinkman 方程, 通过 Brinkman 方程和

Navier-Stokes 方程构建回采工作面的气体流动模型,并引入溶质扩散平移方程和瓦斯的菲克定律得到整个工作面的瓦斯运移耦合模型,更符合实际情况。

2) 结合现场实际条件,通过拖管抽放采空区瓦斯的数值模拟确定出上隅角瓦斯移动式抽采的最佳抽放位置为距离底板 2.4 m、沿倾斜方向距离回风巷道 1.6 m、沿走向深入采空区 15 m 处。

3) 上隅角采取封堵措施后对采空区瓦斯进行数值模拟,结果分析可知对上隅角进行封堵有利于提高抽放效果,进一步降低上隅角瓦斯体积分数。

4) 以常村矿 N3-8 工作面作为试验场地,对数值模拟确定的参数进行了测试和验证,数值模拟和现场测试结果基本一致,最终确定了最佳抽放点位置为距离底板 2.4 m、沿倾斜方向距离回风巷道 1.57 m、沿走向深入采空区 17.4 m 处。

5) 拖管抽采技术为治理上隅角瓦斯提供了一种可行的新方法,能够保持最佳抽放点在空间上的连续性,对降低上隅角瓦斯体积分数和保障安全生产具有重要意义。同时回收抽采管材,降低抽放成本,有极大的经济和社会效益。

参考文献:

- [1] 张人伟,贺晓刚,孙勇,等.朱仙庄综放面采空区“三带”范围的确定及应用[J].采矿与安全工程学报,2008,25(3):332-336.
ZHANG Renwei, HE Xiaogang, SUN Yong, et al. Determination of three-zone in goaf on fully-mechanized face in Zhuxianzhuang coal mine and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 332-336.
- [2] 梁冰,章梦涛,王泳嘉,等.煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法[J].岩石力学与工程学报,1996,15(2):135-142.
LIANG Bing, ZHANG Mengtao, WANG Yongjia, et al. Coal seam gas seepage and deformation of the coupled mathematical model and numerical solution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2): 135-142.
- [3] 胡千庭,梁运培,刘见中.采空区瓦斯流动规律的 CFD 模拟[J].煤炭学报,2007,32(7):719-723.
HU Qianting, LIANG Yunpei, LIU Jianzhong. CFD simulation of goaf gas flow patterns[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 719-723.
- [4] 李东印,许灿荣,熊祖强.采煤工作面瓦斯流动模型及 COMSOL 数值解算[J].煤炭学报,2012,37(6):967-971.
LI Dongyin, XU Canrong, XIONG Zuqiang. Gas flowing model of mining face and solve it using COMSOL[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 967-971.
- [5] 杨天鸿,陈仕阔,朱万成,等.矿井岩体破坏突水机制及非线性渗流模型初探[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1411-1416.
YANG Tianhong, CHEN Shikuo, ZHU Wancheng, et al. Water inrush mechanism in mines and nonlinear flow model for fractured rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1411-1416.
- [6] 李宗翔,孙广义,王继波.回采采空区非匀质渗流场风流移动规律的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增刊2):1578-1581.
LI Zongxiang, SUN Guangyi, WANG Jibo. Numerical simulation for non-homogeneous flow field and movement law of gob[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Sup 2): 1578-1581.
- [7] 姜耀东,祝捷,赵毅鑫,等.基于混合物理理论的含瓦斯煤本构方程[J].煤炭学报,2007,32(11):1132-1137.
JIANG Yaodong, ZHU Jie, ZHAO Yixin, et al. Constitutive equations of coal containing methane based on mixture theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 32(11): 1132-1137.
- [8] 富向,王魁军,杨天鸿.构造煤的瓦斯放散特征[J].煤炭学报,2008,33(7):775-779.
FU Xiang, WANG Kuijun, YANG Tianhong. Gas irradiation feature of tectonic coal[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 775-779.
- [9] 吴世跃,赵文.含吸附煤层气煤的有效应力分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1674-1678.
WU Shiyue, ZHAO Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1674-1678.
- [10] 闫宝珍,王延斌,倪小明.地层条件下基于纳米级孔隙的煤层气扩散特征[J].煤炭学报,2008,33(6):657-660.
YAN Baozhen, WANG Yanbin, NI Xiaoming. Coalbed methane diffusion characters based on nano-scaled pores under formation conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 657-660.
- [11] JIA Y, SONG X C, DUVEAU G, et al. Elastoplastic damage modeling of argillite in partially saturated condition and application[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(8): 656-666.
- [12] MOHAMAD-HUSSEIN A, SHAO J F. Modeling of elastoplastic behavior with non-local damage in concrete under compression[J]. Computers and Structures, 2007, 85(23-24): 1757-1768.
- [13] COMSOL A B. Multiphysics version 3.2, uses guide and reference guide[M]. Stockholm: [s. n], 2005.
- [14] 谢振华,张建业,孙凯.回采面上隅角埋管抽放采空区瓦斯数值模拟[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(5):230-236.
XIE Zhenhua, ZHANG Jianye, SUN Kai. Numerical simulation on gas drainage of gob area by buried pipe in working face upper corner[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(5): 230-236.
- [15] 李宗翔,王继仁,周西华.采空区开区移动瓦斯抽放的数值模拟[J].中国矿业大学学报,2004,33(1):74-78.
LI Zongxiang, WANG Jiren, ZHOU Xihua. Numerical simulation of gas drainage during open region movement in goaf[J]. Journal of China University of Science & Technology, 2004, 33(1): 74-78.