

于斌,夏彬伟,喻鹏. 特厚煤层综放开采坚硬顶板破断对瓦斯涌出影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2243-2249. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1444

YU Bin, XIA Binwei, YU Peng. Effect of hard roof breaking on gas emission in fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2243-2249. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1444

特厚煤层综放开采坚硬顶板破断对瓦斯涌出影响

于斌¹, 夏彬伟^{1,2}, 喻鹏²

(1. 大同煤矿集团有限责任公司, 山西 大同 037003; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 针对具有坚硬顶板的特厚煤层综放工作面周期来压期间瓦斯异常涌出问题, 基于坚硬顶板“O-X”破断机理, 从能量的角度分析了坚硬顶板破断回转对采空区的冲击过程, 得到破断块体轴向作用力与采空区垮落煤岩碎胀系数之间的关系。同时研究了顶煤放出率及垮落煤岩碎胀系数对坚硬顶板破断回转前后采空区体积变化的影响规律, 建立了周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量计算模型, 并与现场实测进行对比。结果表明: 特厚煤层综放工作面坚硬顶板破断回转压缩了采空区体积, 使采空区高浓度瓦斯涌向工作面, 导致周期来压期间瓦斯异常涌出现象。塔山煤矿 8214 工作面周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量理论计算值为 $14.5 \text{ m}^3/\text{min}$, 与现场实测增加量相比误差在 $1.79\% \sim 8.83\%$, 两者结果较为相符, 验证了模型的正确性。

关键词: 瓦斯涌出; 坚硬顶板; 综放开采; 破断回转; 采空区

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2018)08-2243-07

Effect of hard roof breaking on gas emission in fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam

YU Bin¹, XIA Binwei^{1,2}, YU Peng²

(1. Datong Coal Mine Group Company, Datong 037003, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In terms of the issue of the abnormal gas emission during periodic weighting in the fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam, based on the “O-X” type breaking of hard roof, the impact process of hard roof breaking to the goaf is analyzed from the view of energy to get the relationship between the axial force of broken block and the broken expand coefficient of caving coal-rock in goaf. Besides, combined with the effect of the top-coal recovery rate and the broken expand coefficient of caving coal-rock on the volume change of goaf during hard roof breaking, the formula for gas emission increase in goaf during periodic weighting is established, and its results are compared with the measured data. The result shows that the volume of goaf is reduced by the breaking of hard roof in the fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam, so the high concentration of gas in goaf will be poured into the working face which leads to abnormal gas emission during periodic weighting. The theoretical calculation of gas emission increase in goaf for the 8214 working face of Tashan Mine is $14.5 \text{ m}^3/\text{min}$, and the error is between $1.79\% \sim 8.83\%$ compared with the measured data. The results are consistent, which verifies the correctness of the formula.

Key words: gas emission; hard roof; fully-mechanized sublevel caving mining; breaking and rotating; goaf

收稿日期: 2017-10-21 修回日期: 2018-02-06 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 重庆市博士后科研资助项目(Xm2017199); 中国博士后面上基金资助项目(2016M602655)

作者简介: 于斌(1962—), 男, 黑龙江海伦人, 教授级高级工程师。Tel: 0352-7868878, E-mail: yubin0352@163.com

通讯作者: 夏彬伟(1978—), 男, 重庆市人, 副教授, 博士。E-mail: xbwei33@cqu.edu.cn

晋北、神东、陕北等矿区多采用综放开采工艺且均具有煤层特厚、瓦斯含量较低、顶板坚硬等特征。周期来压期间回采工作面极易出现瓦斯异常涌出现象,严重威胁工作面的安全高效生产,许多学者对此进行了研究。姜福兴等^[1]通过微地震监测技术以及工作面超前煤体的百米钻孔瓦斯自然涌出量的现场实测,确定了周期来压期间导致工作面超限的瓦斯主要来自于采空区。李化敏等^[2-3]通过现场监测和模拟实验,得出采空区瓦斯受到顶板破断垮落的挤压作用会向着工作面方向移动,导致工作面瓦斯体积分数增高。杨永辰等^[4]对煤矿瓦斯事故的原因进行理论分析,得出其主要原因是来压期间顶板破断垮落导致采空区深部积聚的大量瓦斯被挤向采煤工作面。李树刚等^[5-6]通过对放顶煤工作面顶板破断垮落过程及特征的分析,研究了采空区顶板垮落对工作面瓦斯涌出的影响。蔡建德等^[7]采用现场监测和相似模拟的方法研究了采空区坚硬顶板破断垮落与采场瓦斯浓度变化的关系。可见坚硬顶板破断垮落使采空区内部高浓度瓦斯涌向工作面是导致来压期间瓦斯异常涌出的重要原因之一,但以上研究仍存在以下问题:① 周期来压期间坚硬顶板的破断回转在研究中多被简化为顶板整体切落模型;② 特厚煤层综放开采放顶率较低,采空区内遗留了大量顶煤,研究中对遗留的顶煤考虑较少。

笔者基于特厚煤层综放工作面坚硬顶板“O-X”破断机理,从能量的角度分析了坚硬顶板破断回转对采空区的冲击过程,得到破断块体轴向作用力与采空区垮落煤岩碎胀系数之间的关系。进而研究了顶煤放出率及垮落煤岩碎胀系数对坚硬顶板破断回转前后采空区体积变化的影响规律,建立了周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量的计算模型,为矿井瓦斯灾害防治提供依据。

1 顶板破断对采空区冲击的动力学分析

在煤矿开采过程中,随着回采工作面的推进,工作面的顶板在其自重及上覆岩层载荷的作用下,发生变形下沉,达到其极限强度时即发生破断,引起采场来压现象。根据岩层控制理论,坚硬顶板弯矩最大值发生在板中心部位,而后在工作面运输巷和回风巷处形成裂缝,随着四周裂隙贯通而呈扁“O”形,板中心弯矩超过强度极限形成裂隙,导致“X”形破裂。在工作面周期来压过程中,坚硬顶板的破断类型多为半“O-X”型破断。特厚煤层综放开采情况下,采空区矸石不能对顶板起到有效地支撑作用,破断的坚硬顶板会以“悬臂梁”的结构形式发生回转垮落运动^[8-9]。

基于坚硬顶板“O-X”型破断机理,把顶板破断块体简化为半椭圆形,并对其回转过程进行动力学分析,如图1,2所示。

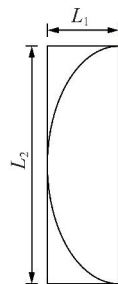


图1 坚硬顶板破断块体简化模型

Fig. 1 Simplified model of broken block of hard roof

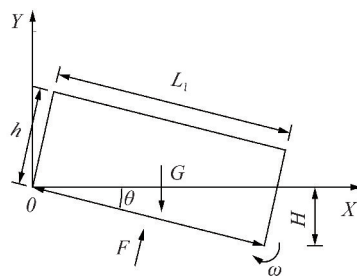


图2 周期来压顶板垮落动力学分析

Fig. 2 Mechanical process analysis of roof caving in goaf

采空区坚硬顶板破断回转对采空区内遗煤以及矸石产生冲击,可以看作是破断块体与垮落煤岩的完全非弹性碰撞^[10]。坚硬顶板破断后,由近水平位置向下回转,通过动能定理可得

$$\frac{1}{2}GH = \frac{1}{2}J\omega^2 + W \quad (1)$$

式中, G 为破断块体的重力,N; H 为破断块体的下沉距离,m; J 为破断块体的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为块体与矸石接触的角速度, rad/s ; W 为垂直作用于破断块体上的气体压力做功, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

破断块体的重力 G 为

$$G = \frac{1}{2}\rho g \pi L_1 \frac{L_2}{2} h \quad (2)$$

式中, ρ 为破断块体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^3$; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; L_1 为周期来压步距,m; L_2 为工作面长度,m; h 为破断块体的厚度,m。

破断块体接触垮落煤岩时的下沉距离 H 为

$$H = L_1 \sin \theta \quad (3)$$

式中, θ 为破断块体接垮落触煤岩时的回转角度, $(^\circ)$ 。

破断块体的转动惯量 J 为

$$J = \frac{1}{3} \frac{G}{g} (L_1^2 + h^2) = \frac{1}{12} \rho \pi L_1 L_2 h (L_1^2 + h^2) \quad (4)$$

采空区气体作用于破断块体的气体压力 F 为

$$F = \frac{1}{2} \pi L_1 \frac{L_2}{2} P_\theta \quad (5)$$

式中, P_θ 为破断块体回转垮落过程中采空区气体压力, 是关于回转角度 θ 的函数^[11], Pa。

假设坚硬顶板破断回转过程为等温过程, 破断前采空区体积为 V_1 , 气体压力为 P_1 , 破断块体回转 θ 度时采空区体积为 V_θ , 则 P_θ 可以表示为

$$P_\theta = V_1 P_1 / V_\theta \quad (6)$$

采空区气体对破断块体所做的功 W 为

$$W = \int_0^\theta F L_1 d\theta = \frac{1}{4} \pi L_1^2 L_2 \int_0^\theta P_\theta d\theta \quad (7)$$

则坚硬顶板破断块体对采空区内遗煤及矸石的冲量 I 为

$$I = J\omega =$$

$$\sqrt{\frac{1}{24} \rho \pi^2 L_1^3 L_2^2 h (L_1^2 + h^2) \left(\frac{1}{2} \rho g h \sin \theta - \int_0^\theta P_\theta d\theta \right)} \quad (8)$$

故坚硬顶板破断回转对采空区遗煤及矸石的作用力 F_0 可表示为

$$F_0 = \frac{G}{2} + \frac{I}{t_1} = \frac{1}{8} \rho g \pi L_1 L_2 h +$$

$$\sqrt{\frac{1}{24} \rho \pi^2 L_1^3 L_2^2 h (L_1^2 + h^2) \left(\frac{1}{2} \rho g h \sin \theta - \int_0^\theta P_\theta d\theta \right)} / t_1 \quad (9)$$

式中, t_1 为坚硬顶板破断回转冲击载荷作用持续时间, s。

则遗煤及矸石承受的轴向压力 σ 为

$$\sigma = F_0 \cos \theta / A = \frac{\cos \theta}{A} \left\{ \frac{1}{8} \rho g \pi L_1 L_2 h +$$

$$\sqrt{\frac{1}{24} \rho \pi^2 L_1^3 L_2^2 h (L_1^2 + h^2) \left(\frac{1}{2} \rho g h \sin \theta - \int_0^\theta P_\theta d\theta \right)} / t_1 \right\} \quad (10)$$

式中, A 为破断块体与垮落煤岩接触面积, m^2 。

研究认为, 无论岩石强度与块度如何, 碎胀系数与轴向压力之间均满足

$$K_p = a \ln \sigma + b \quad (11)$$

其中, a, b 为回归系数; 且 a 取 -0.15, b 取 1.25^[12]。

坚硬顶板破断回转能压实采空区遗煤及矸石, 同时使采空区空间体积减小, 挤压采空区气体, 导致高浓度的瓦斯气流涌向工作面, 造成来压期间瓦斯涌出异常。

2 顶板破断前后采空区体积变化对瓦斯涌出的影响

在特厚煤层综放开采中, 随着回采工作面的推

进, 采空区遗煤和软弱岩层在自重及其上覆岩层的载荷作用下, 发生断裂、破碎, 而后相继冒落。由于坚硬顶板破断块体的回转垮落, 冒落的煤岩体处于承压状态, 破断块体下的遗煤及矸石被逐渐压实。

为了进一步分析坚硬顶板回转垮落对采空区内气体涌出的影响, 把坚硬顶板破断后的采空区形态简化成截面为直角梯形的四棱柱, 并计算坚硬顶板垮落前后采空区空间体积的变化, 如图 3 所示。

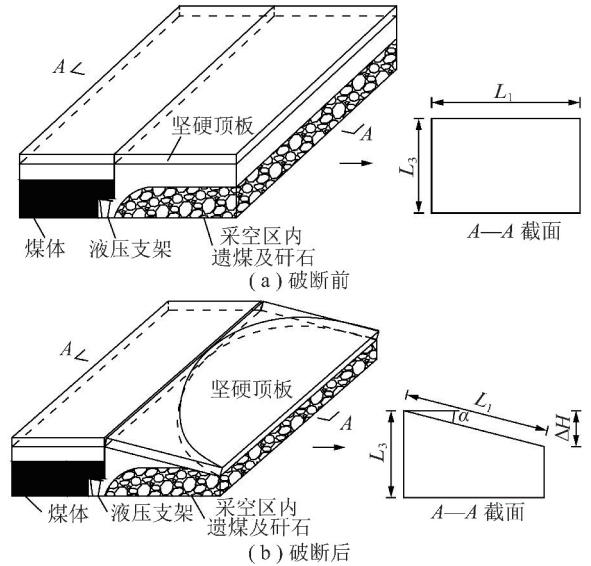


图 3 坚硬顶板破断前后采空区简化模型

Fig. 3 Simplified model of goaf before and after hard roof breaking

坚硬顶板破断前下方的空间体积 V_1 为

$$V_1 = L_1 L_2 L_3 \quad (12)$$

式中, L_3 为坚硬顶板距煤层底板的距离, m。

坚硬顶板距煤层底板的距离 L_3 即为采煤厚度 m_1 , 放煤厚度 m_2 , 坚硬顶板下方软弱岩层厚度 m_3 之和。

特厚煤层综放开采过程中, 顶煤采出率普遍较低, 采空区遗煤量较大, 计算坚硬顶板垮落前采空区体积时应考虑采空区遗煤的影响。设顶煤采出率为 c , 则采空区垮落煤岩被压实后, 坚硬顶板破断块体末端的总位移量 ΔH 为

$$\Delta H = m_1 + m_2 + m_3 - (1 - c) m_2 K_p - m_3 K_p = m_1 + m_2 [1 - (1 - c) K_p] - m_3 (K_p - 1) \quad (13)$$

则破断块体的最终倾斜角度 α 可以表示为

$$\alpha = \arcsin(\Delta H / L_1) \quad (14)$$

坚硬顶板破断后下方的空间体积 V_2 为

$$V_2 = \frac{1}{2} (2L_3 - \Delta H) L_2 L_1 \cos \alpha = \frac{1}{2} \cos \alpha L_1 L_2 \times [m_1 + m_2 (1 + K_p - c K_p) + m_3 (1 + K_p)] \quad (15)$$

周期来压期间坚硬顶板回转垮落导致采空区空间体积的变化量 ΔV 为

$$\Delta V = V_1 - V_2 = L_1 L_2 (m_1 + m_2 + m_3) - \frac{1}{2} \cos \alpha L_1 L_2 [m_1 + m_2 (1 + K_p - cK_p) + m_3 (1 + K_p)] \quad (16)$$

坚硬顶板回转垮落期间,破断块体下方大部分气体会涌向采煤工作面,同时也有一部分气体会向采空区深部流动。假定采空区浅部瓦斯平均浓度为 C ,周期来压持续时长为 t_2 ,漏风率取 15%^[13],则来压期间采空区瓦斯涌出增加量 Q 约为

$$Q = 0.85 \Delta V C / t_2 = 0.85 C \{ L_1 L_2 (m_1 + m_2 + m_3) - \frac{1}{2} \cos \alpha L_1 L_2 [m_1 + m_2 (1 + K_p - cK_p) + m_3 (1 + K_p)] \} / t_2 \quad (17)$$

通过研究顶板破断前后采空区空间体积的变化,能够估算采空区瓦斯涌出量,为周期来压期间瓦斯治理提供依据。

以大同矿区塔山煤矿 8214 综放工作面为例,该工作面主采石炭系 3~5 号煤层,平均煤厚 12 m,属于特厚煤层。工作面走向长度 2 160 m,倾向长度 230.5 m,采用一次采全高放顶煤开采,采煤厚度 3.5 m,放煤厚度 8.5 m。煤层上方存在一层平均厚度 4 m 的火成岩,火成岩的普氏系数为 IV 甲类,属相当坚硬的岩石。

根据塔山综放工作面的实际情况可知^[14-15],坚硬顶板平均密度为 2 800 kg/m³,破断步距约为 35 m,块体与垮落煤岩接触时回转角度约为 15°,来压期间工作面气体压力约为 0.11 MPa,平均来压持续时长为一个班约 6 h,顶煤采出率 c 为 85%。

现场实测大同矿区坚硬顶板破断回转冲击载荷作用持续时间约为 10 s^[16],由式(10)可以计算出坚硬顶板破断回转对采空区遗煤及矸石的作用力 σ 约为 0.53 MPa。

破断坚硬顶板下方遗煤及矸石的碎胀系数为

$$K_p = -0.15 \ln 0.53 + 1.25 = 1.35 \quad (18)$$

通过布置在采空区内部束管监测数据可知^[14],来压期间,采空区 0~40 m 范围内瓦斯体积分数的平均值为 14%。

根据式(17),计算周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量 Q 约为

$$Q = 0.85 \times 0.14 \times \{ 35 \times 230.5 \times 12 - 0.5 \times 0.956 \times 35 \times 230.5 \times [3.5 + 8.5 \times (1 + 0.15 \times 1.35)] \} \div (6 \times 60) = 14.5 \text{ m}^3/\text{min} \quad (19)$$

3 坚硬顶板破断对瓦斯涌出影响实测分析

特厚煤层综放工作面回采期间,采空区内遗煤以及煤壁瓦斯持续解吸,使其存在有高浓度的瓦斯气体。因为采空区处于相对封闭的状态,在非来压的情况下,采空区内瓦斯分布状态较为稳定,涌入工作面的量较为平稳。周期来压过程中,坚硬顶板破断、回转垮落导致采空区空间体积发生变化,改变了瓦斯原有的分布状态,迫使其涌向采煤工作面。

基于大同矿区塔山煤矿 8214 综放工作面现场监测结果,分析坚硬顶板垮落对瓦斯涌出影响。如图 4 所示,5 月份该工作面共经历 5 次周期来压,伴随着采空区坚硬顶板的回转破断,工作面液压支架工作阻力增大 1.7 倍左右,工作面瓦斯涌出量显著增加,且略延迟于支架阻力峰值。统计 5 次周期来压来压前及来压期间工作面瓦斯涌出量平均值,见表 1。

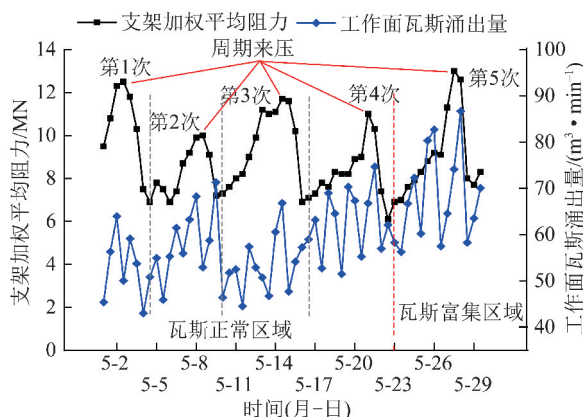


图 4 支架阻力与工作面瓦斯涌出量关系

Fig. 4 Relationship between support resistance and gas emission of working face

表 1 工作面瓦斯涌出量平均值

Table 1 Average value of gas emission in working face

| 周期来压次数 | 周期来压前 | 周期来压期间 |
|--------|-------|--------|
| 1 | 48 | 63 |
| 2 | 50 | 67 |
| 3 | 50 | 65 |
| 4 | 57 | 72 |
| 5 | 65 | 81 |

研究表明,回采工作面瓦斯涌出一般分为煤壁瓦斯涌出,采落煤瓦斯涌出以及采空区瓦斯涌出 3 部分。通过对 8214 工作面各部分瓦斯涌出量现场实测,分析得出正常开采期间采空区瓦斯涌出占瓦斯涌出总量的 56.9%,周期来压期间采空区瓦斯涌出占

瓦斯涌出总量的 64.5%^[17]。则采空区瓦斯涌出量的平均值,见表 2。

表 2 采空区瓦斯涌出量平均值

Table 2 Average value of gas emission in goaf

| 周期来压次数 | m ³ /min | | |
|--------|---------------------|--------|-------|
| | 周期来压前 | 周期来压期间 | 涌出增加量 |
| 1 | 27.3 | 40.6 | 13.3 |
| 2 | 28.5 | 43.2 | 14.8 |
| 3 | 28.5 | 41.9 | 13.4 |
| 4 | 32.4 | 46.4 | 14.0 |
| 5 | 37.0 | 52.2 | 15.2 |

对比分析理论计算得出的采空区瓦斯涌出增加量 14.5 m³/min 与现场实测的 5 次周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量,两者之间的误差分别为 8.83%, 1.79%, 7.61%, 3.52% 和 4.98%, 如图 5 所示,验证了模型的正确性。

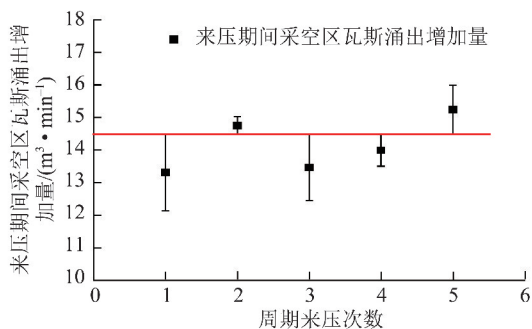


图 5 周期来压采空区瓦斯涌出增加量误差

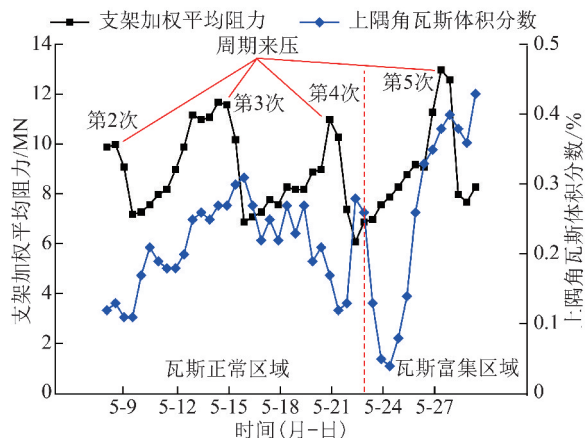
Fig. 5 Error chart of gas emission increase in goaf during periodic weighting

周期来压期间,采空区内部相对稳定的流场受坚硬顶板破断回转的冲击扰动,高体积分数瓦斯气体涌向回采工作面,并随风流被带出。塔山煤矿 8214 综放工作面采用“U+I”型通风方式,工作面回风由回风巷和顶板高抽巷两部分组成。采空区内涌出的瓦斯必然会经过上隅角和高抽巷,上隅角和高抽巷瓦斯体积分数的变化能很好的反映出顶板破断挤压采空区气体对瓦斯涌出的影响。

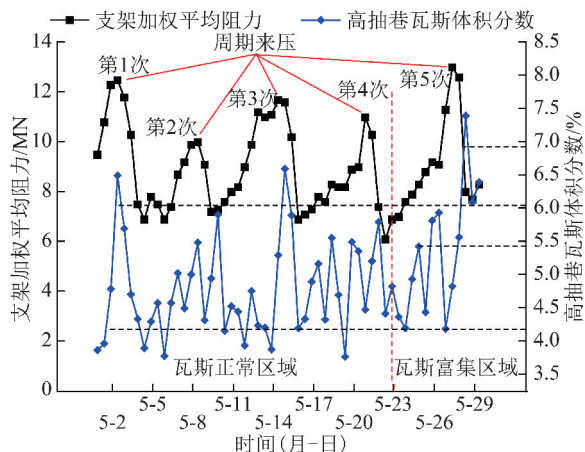
上隅角位于采煤工作面的回风侧,同时靠近回风巷上帮和采空区边缘的三角地带,是工作面漏风的主要出口。坚硬顶板破断时,被挤压的高体积分数瓦斯气体向工作面运动,其影响在上隅角较为显著。分析图 6(a)可知,受坚硬顶板破断影响,上隅角瓦斯体积分数呈现周期性变化,瓦斯浓度峰值出现的间距与顶板破断垮落步距基本相符,但是现场对上隅角进行抽采导致其瓦斯体积分数较低。

顶板高抽巷位于 3~5 号煤层顶板稳定岩层中,

与煤层顶板垂距为 20 m,与回风水平内错 20 m。坚硬顶板破断引起采场周期来压过程中,高抽巷由于位置原因,采场前方煤岩体破碎解吸所释放瓦斯对其影响较小。



(a)阻力与上隅角瓦斯体积分数关系



(b)阻力与高抽巷瓦斯体积分数关系

图 6 支架阻力与上隅角和高抽巷瓦斯体积分数关系

Fig. 6 Relationship between support resistance and gas concentration of upper corner and highly-located drainage roadway

如图 6(b)所示,随着坚硬顶板周期性的破断,高抽巷瓦斯体积分数呈现出周期性的变化规律,当工作面支架阻力出现峰值时,高抽巷瓦斯体积分数也会出现峰值。第 1~4 次周期来压来压前,高抽巷的平均瓦斯体积分数在 4.2% 左右,来压期间平均体积分数增大到约 6.1%;第 5 次周期来压时,工作面进入瓦斯富集区域,平均瓦斯体积分数由 4.8% 增大到 6.9%,证实了坚硬顶板破断垮落会引起高体积分数瓦斯气体向采空区外部流动,导致瓦斯涌出量增大。

4 综放工作面瓦斯控制方法

针对采空区瓦斯涌出量大的问题,现场采用了地面钻孔抽采、上隅角抽采相结合的协同瓦斯控制方法(图 7,8),并在塔山矿 8204 工作面布置了抽采系统。

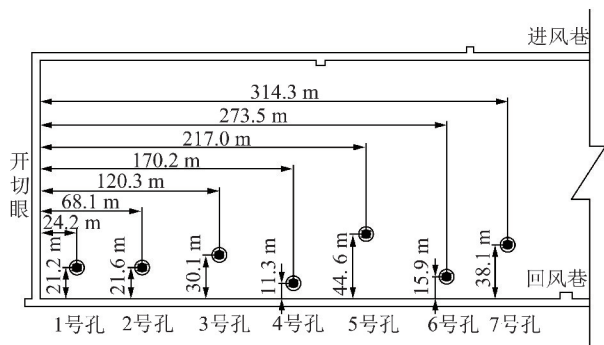


图7 地面瓦斯抽采钻孔布置

Fig. 7 Layout of ground gas drainage borehole

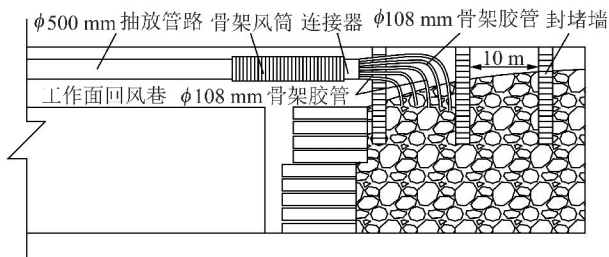


图8 上隅角插管抽采方法示意

Fig. 8 Upper corner gas drainage with buried pipes

随着回采工作面的推进,由于坚硬顶板的破断,采空区四周因围岩的支撑作用形成了导气性能良好的裂隙带,而采空区中部因上覆岩层的压力趋于压实。采空区内部的瓦斯会随着空区漏风风流富集在回风巷一侧裂隙圈内并通过上隅角涌向回采工作面。利用采空区瓦斯运移的这一特性,在回风巷一侧布置地面钻孔同时在上隅角插管抽采,控制采空区瓦斯涌向工作面。

地面钻孔抽采过程中,采用3个钻孔联合抽采,其中两个钻孔直接抽采采空区,另外一个抽采工作面前方煤岩裂隙带。工作面推进至距钻孔30~40 m时,地面钻孔通过煤体裂隙带时开始发挥作用;工作面推进至超过钻孔50~100 m后,地面钻孔抽采效果逐渐减弱。

随着回采工作面的推进,如图9可知,在0~40 m范围内,瓦斯抽采纯量为 $6 \text{ m}^3/\text{min}$,分析可知,在开采初期,采空区范围较小瓦斯含量低,2,3号钻孔主要抽采工作面前方煤体瓦斯,抽采纯量较低。在40 m后,瓦斯抽采纯量瞬间升高,工作面进入初次来压区域,造成前方煤体破碎,瓦斯通道导通使抽采量增大,40~320 m范围,抽采瓦斯纯量在 $25 \text{ m}^3/\text{min}$ 附近波动,采位在320~450 m,抽采瓦斯纯量在 $20 \text{ m}^3/\text{min}$ 附近波动。

上隅角插管抽采过程中,抽排气体混合量在

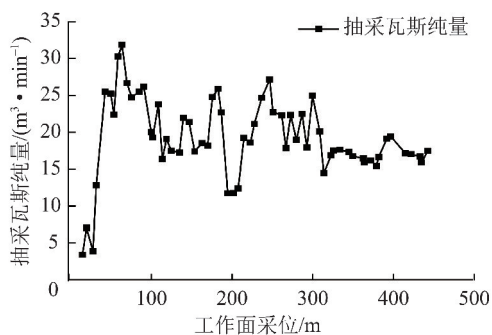


图9 钻孔抽采瓦斯纯量与工作面采位对应关系

Fig. 9 Relationship between the amount of gas extracted and the position of working face

320~340 m^3/min ,抽排瓦斯体积分数在1.0%~2.5%,抽排瓦斯纯量为3.2~8.5 m^3/min ,占工作面绝对瓦斯涌出量的9%~20%,将上隅角瓦斯体积分数控制在0.3%左右,有效的解决了工作面上隅角瓦斯积聚问题。

通过地面钻孔和上隅角插管的共同作用,将工作面回风流瓦斯体积分数控制在0.25%左右,有效的控制瓦斯涌向回采工作面。

5 结 论

(1)针对特厚煤层综放工作面采煤厚度大,采空区遗煤量多的特点,基于坚硬顶板“O-X”破断机理,从能量的角度分析了坚硬顶板破断回转对采空区的冲击过程,得到破断块体轴向作用力与采空区垮落煤岩碎胀系数之间的关系。表明坚硬顶板破断回转压实了采空区的遗煤及矸石,同时改变了采空区空间体积,对空气产生挤压作用导致采空区高浓度瓦斯涌入工作面。

(2)通过把坚硬顶板破断回转后的采空区形态简化成截面为直角梯形的四棱柱,研究了特厚煤层综放工作面坚硬顶板破断回转采空区空间体积变化与顶煤放出率及垮落煤岩碎胀系数的关系,建立了周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量的计算模型,并以塔山煤矿8214工作面为例,通过理论计算得到周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量为 $14.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

(3)将理论计算值与8214工作面5月份周期来压期间采空区瓦斯涌出增加量实测值相对比,两者之间的误差分别为8.83%,1.79%,7.61%,3.52%和4.98%,结果较为相符,验证了模型的正确性。并通过现场监测发现上隅角和高抽巷瓦斯体积分数变化与坚硬顶板周期破断具有一致性并呈现周期性,证实了坚硬顶板破断回转使采空区高瓦斯气体涌入工作面导致周期来压期间瓦斯异常涌出。

(4)在塔山煤矿 8204 综放工作面建立了协同瓦斯控制系统。3 个地面钻孔联合抽采时,抽采瓦斯纯量在 $20 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右;上隅角埋管抽采瓦斯纯量为 $3.2 \sim 8.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 。协同瓦斯控制系统运行后,将工作面上隅角、后溜尾瓦斯体积分数控制在 0.3% 左右,将工作面回风流瓦斯体积分数控制在 0.25% 左右,抽采效果明显,降低了工作面瓦斯隐患。

参考文献 (References):

- [1] 姜福兴,孔令海,刘春刚.特厚煤层综放采场瓦斯运移规律[J].煤炭学报,2011,36(3):407-411.
JIANG Fuxing, KONG Linghai, LIU Chungang. Gas emission laws of fully-mechanized sublevel caving mining in extra-thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 407-411.
- [2] 李化敏,王文,熊祖强.采动围岩活动与工作面瓦斯涌出关系[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1):11-16.
LI Huamin, WANG Wen, XIONG Zuqiang. Relationship between mining induced surrounding rock movement and gas emission in working face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 11-16.
- [3] 李化敏,苏承东,宋常胜.采空区顶板垮落与瓦斯涌出关系的模拟实验研究[J].煤炭工程,2007(11):72-75.
LI Huamin, SU Chengdong, SONG Changsheng. Simulation experimental study of the relationship between gob roof caving and gas emission[J]. Coal Engineering, 2007(11): 72-75.
- [4] 杨永辰,孟金锁,王同杰,等.采煤工作面特大瓦斯爆炸事故原因分析[J].煤炭学报,2007,32(7):734-736.
YANG Yongchen, MENG Jinsuo, WANG Tongjie, et al. Causes analysis of gas explosion accident happened in working face[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 734-736.
- [5] 李树刚,刘志云.综放面矿山压力与瓦斯涌出监测研究[J].矿山压力与顶板管理,2002,19(1):100-102.
LI Shugang, LIU Zhiyun. Research on monitoring of ground pressure and gas emission in fully mechanized caving face[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(1): 100-102.
- [6] 李树刚.综放开采围岩活动及瓦斯运移[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000:60-72.
- [7] 蔡建德.采场矿山压力变化与瓦斯涌出关系研究[D].焦作:河南理工大学,2007.
CAI Jiande. Relationship between underground pressure changing of working face and gas emission[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2007.
- [8] 于斌,朱卫兵,高瑞,等.特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J].煤炭学报,2016,41(3):571-580.
YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Strata structure and its effect mechanism of large space stope for fully-mechanized sublev-

el caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 571-580.

- [9] 鞠金峰,许家林,王庆雄.大采高采场关键层"悬臂梁"结构运动型式及对矿压的影响[J].煤炭学报,2011,36(12):2115-2120.
JU Jinfeng, XU Jialin, WANG Qingxiong. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height workplace [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2115-2120.
- [10] 杨磊.华亭煤矿采场强矿压条件下瓦斯涌出规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
YANG Lei. Research on methane flow law caused by strong mining pressure of Huating Coal Mine [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2014.
- [11] 邢平伟.采空区顶板冒落空气冲击灾害的理论及控制技术研究[D].太原:太原理工大学,2013.
XING Pingwei. Research on theory and control technology of air impact disasters caused by goaf roof falling [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [12] 马占国.采空区破碎岩体压实和渗流特性研究[M].徐州:中国矿业大学,2009.
- [13] 付明明,张英华,黄志安,等.弧形顶板垮落对上隅角瓦斯扰动的研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):185-190.
FU Mingming, ZHANG Yinghua, HUANG Zhi'an, et al. Research of the disturbance of curved roof caving for gas in upper corner [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(1): 185-190.
- [14] 梁诗齐.塔山煤矿综放面采空区瓦斯涌出规律及综合抽采技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013.
LIANG Shiqi. Research of gas emission regularity and comprehensive extraction technology for fully mechanized top-coal caving face and goaf in Tashan Coal Mine [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013.
- [15] 金铃子.塔山煤矿综放面采空区瓦斯运移规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.
JIN Lingzi. Research of gas movement regularity for fully mechanized top coal caving face and goaf in Tashan Coal Mine [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012.
- [16] 杨敬轩,刘长友,于斌,等.坚硬厚层顶板群结构破断的采场冲击效应[J].中国矿业大学学报,2014,43(1):8-15.
YANG Jingxuan, LIU Changyou, YU Bin, et al. Impact effect caused by the fracture of thick and hard roof structures in a long-wall face [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 8-15.
- [17] 郭世杰.塔山矿顶板运动对工作面瓦斯涌出及富集规律影响研究[D].重庆:重庆大学,2016.
GUO Shijie. A study on influence of the roof movement on the gas emission and enrichment pattern at the working place at the Tashan Mine [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.