

文章编号: 1673-3363-(2014)03-0483-06

综放开采偏 W 型通风系统及工作面参数优化研究

李英明^{1,2}, 徐继成¹, 张瀚¹, 杨明东¹, 付永刚³

(1. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室(安徽理工大学), 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学矿业工程博士后流动站, 安徽 淮南 232001; 3. 段王煤业集团有限公司段王煤矿, 山西 晋中 045400)

摘要 针对高瓦斯工作面采用传统 U 型通风上隅角瓦斯超限问题, 提出了偏 W 型通风系统, 采用数值模拟方法研究了这一通风系统瓦斯流场特征, 及在保证回采安全前提下, 进行了最大限度提高回采率的工作面参数优化研究。结果表明: 采用偏 W 型通风系统, 其工作面、回风流、上隅角瓦斯体积分数明显降低, 有效地解决了 U 型通风瓦斯超限问题, 可保证工作面的安全开采。煤柱留设宽度 15 m 能够保证掘进和回采期间煤柱稳定, 研究成果的现场应用保证了工作面安全高效开采。这一通风系统可为其他高瓦斯综放面安全高效开采提供了一条新的技术途径。

关键词 综采放顶煤; 偏 W 型通风系统; 数值模拟; 煤柱宽度

中图分类号 TD 724

文献标志码 A

Partial W type ventilation system and its parameters optimization of longwall mining with sublevel caving

LI Yingming^{1,2}, XU Jicheng¹, ZHANG Han¹, YANG Mingdong¹, FU Yonggang³

(1. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education (Anhui University of Science and Technology), Huainan, Anhui 232001, China; 2. Mining Engineering Center for Post-Doctoral Studies, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. Duanwang Mine, Duanwang Coal Industry Group Company, Jinzhong, Shanxi 045400, China)

Abstract In view of methane overrun with U type ventilation, Partial W type ventilation system is put forward. Gas emission law is studied by numerical simulation. Working face parameter is optimized to improve extraction rate as much as possible on the premise of mining safety. Research results show that gas concentration of working face, return current and upper corner drop sharply and methane overrun problem with U type ventilation is solved effectively; when coal pillar is 15 m wide, it will be stable in the course of drifting and mining. Field application of above findings ensures safety and high efficiency mining. The ventilation system provides a new method to realize the safe and efficient mining of high gas longwall mining with sublevel caving.

Key words longwall mining with sublevel caving; partial W type ventilation system; numerical simulation; coal pillar width

对于高瓦斯采煤工作面, 采用传统的 U 型通风方式, 上隅角瓦斯超限问题严重, 为解决这一问题

主要有 3 种通风方式: 1) 三巷布置的 U+L 型通风方式^[1-2]。这种系统不仅增加了工作面的风排瓦斯量,

收稿日期: 2013-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004002); 中国博士后科学基金项目(2013M541812)

作者简介: 李英明(1975-), 男, 黑龙江省克山县人, 副教授, 工学博士, 从事采煤方法及矿山压力与岩层控制方面的研究。

E-mail: libo_1296@126.com

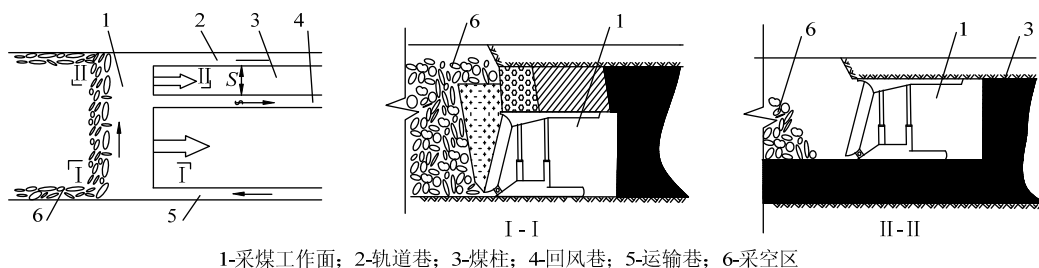
Tel: 15855449842

而且由于瓦斯体积分数分布的改变,大大改善了 U 型工作面上隅角瓦斯超限问题。但其尾巷保留困难,特别对于三软巷道尾巷变形更为严重,也存在联络巷之间煤柱无法回采而使工作面回采率偏低的弊端。2) Y 型通风方式。采煤工作面的上、下巷都进风,而其中的副进风巷在采空区一段则变成回风巷,并由巷旁充填支护,从根本上解决了上隅角瓦斯积聚难题,但留巷难度大,现在还处于试验阶段^[3]。3) W 型通风方式^[4-5]。常采用上、下平巷进风,中间平巷回风的 W 型通风系统,由于风量可成倍提高,增加了高瓦斯工作面生产安全性。对于一些高瓦斯综采放顶煤工作面,由于岩层条件和矿山压力大等原因,不具备采用 U+L 和 Y 型通风条件,可使用 W 型通风方式。但问题在于:由于回采轨道巷和回风巷间煤体时支架沿顶板支设,只回收顶煤丢底煤,会造成大量煤炭损失。所以,通常意义的 W 型通风方式在经济上不适合综放开采。因此,本文提出适合高瓦斯综采放顶煤工作面的偏 W 型通风系统,并以段王煤矿一综放工作面为工程背

景,介绍了偏 W 型通风系统,采用数值模拟研究了这一通风系统瓦斯流场,并对其工作面参数进行优化研究,以在保证回采安全前提下最大限度地提高回采率。

1 偏 W 型通风系统

偏 W 型通风系统巷道布置如图 1 所示,其特征是:在采煤工作面的下侧为运输巷;采煤工作面的上侧顺序布置有相互平行的轨道巷和回风巷;回风巷布置在距离轨道巷较近的工作面上部;轨道巷和运输巷同时兼作进风巷道;轨道巷与回风巷之间为煤柱(宽度为 S);在综放回采过程中,工作面回风巷至运输巷卧底放顶煤,如图 1(I-I 剖面)所示,而回采回风巷与轨道巷之间煤柱时,支架沿顶板支设,只回收顶煤留底煤,如图 1(II-II 剖面)所示;工作面回采时新鲜风流经过轨道巷和运输巷进入采煤工作面,再流入回风巷中,由于回风巷偏近于轨道巷,风流行程形成偏 W 型。



1-采煤工作面; 2-轨道巷; 3-煤柱; 4-回风巷; 5-运输巷; 6-采空区

图 1 综采放顶煤偏 W 型通风系统图

Fig.1 Partial W type ventilation system of longwall mining with sublevel caving

2 偏 W 型通风系统瓦斯流场特征研究

以段王矿综放面为模拟研究对象,利用 Fluent 软件^[6-7]模拟在相同的瓦斯涌出量和数学模型条件下 U 型和偏 W 型 2 种通风方式三维物理模型的瓦斯流场,从而对比分析出 2 种通风方式的优劣。

以采空区与工作面区域相邻接处的中部与底板顶端平面的交点作为模型的坐标原点。 X 轴由工作面指向采空区深处, Y 轴沿回采工作面长方向并指向回风侧, Z 轴指向顶板。三维物理模型中工作面 XYZ 方向尺寸为 $5\text{ m} \times 186\text{ m} \times 3.4\text{ m}$,采空区尺寸为 $200\text{ m} \times 186\text{ m} \times 25\text{ m}$,巷道尺寸为 $4.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 。根据同一煤层相邻工作面最大瓦斯涌出记录,数值模拟时的全部瓦斯涌出量设置为 $20\text{ m}^3/\text{min}$,其中采空区瓦斯释放占全部瓦斯涌出量的 70%。选择压力基求解器的稳态求解,湍流模型为 $\kappa - \varepsilon$ 两方

程模型。

数值模拟出的 $Z=2$ 平面采场压力如图 2 所示,可以看出 U 型工作面是典型的“一源一汇”工作面,在进风巷毗邻工作面下隅角处压力最高,与采空区内部形成压力差,风流由此漏入采空区,形成进入采空区的风流端,即源;在回风巷毗邻工作面上隅角处压力最低,与采空区内部形成压力差,采空区内的气体流出,也将采空区内的瓦斯带出,形成流出工作面的风流端,即汇。采空区瓦斯的涌出往往导致工作面上隅角瓦斯超限,回风巷瓦斯体积分数高。为解决上隅角瓦斯超限的问题,现场采取的措施一般为增大工作面的通风量稀释瓦斯;但供风量增大的同时造成工作面和采空区的压差,从而导致采空区内更多的瓦斯涌出,通过增大供风量来解决上隅角的瓦斯超限问题达不到预期的效果。两进一

回偏W型通风突破了传统的“一源一汇”工作面的局限性,形成“多源一汇”工作面,从静压图中可以看出,U型通风的上下回风巷的压差约为45 Pa,而偏W型通风的为20 Pa,可见偏W型通风可增大供风量,同时又缩小工作面 and 采空区间的压差,可抑制采空区的漏风,亦即抑制瓦斯的涌出。

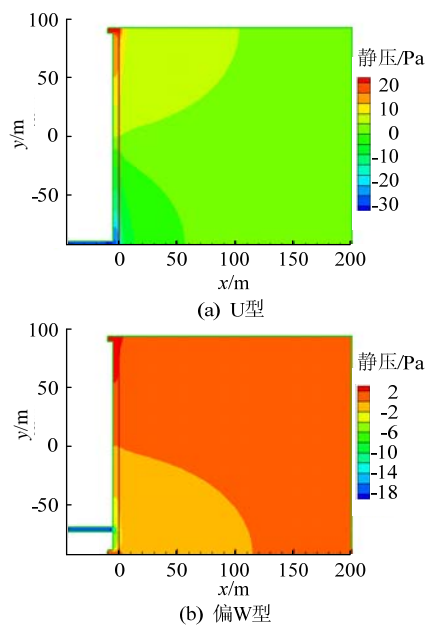


图2 U型和偏W型通风系统的静压图
Fig.2 Static pressure of U type and partial W type ventilation system

图3为“一源一汇”U型通风系统Z=2平面的瓦斯体积分数分布图,图中X=0处的红线为工作面与采空区交界处,红线左侧为工作面,红线右侧为采空区。图的左侧为局部放大图。在X方向,距离工作面越远,采空区内部瓦斯体积分数越大,距工作面20 m以内为瓦斯变化剧烈区,主要是因为顶板刚冒落不久,未被压实,孔隙率较大,漏风较多,瓦斯体积分数的变化也就较为剧烈;20~100 m段为稳定变化区,瓦斯体积分数逐步有规律地增加;距工作面100 m以后的采空区回风巷侧瓦斯体积分数基本维持不变,处于80%以上,主要是由于这一区段的冒落岩体被逐渐压实,孔隙率较小,漏风风流到此趋于静止,瓦斯体积分数趋于稳定。在Y方向,从工作面局部放大图可以看出,工作面自进风巷至回风巷,自上而下,处于新鲜风流下,瓦斯体积分数很低,但在漏风汇处,进入采空区的风流在此急剧汇合,工作面内距回风巷40 m处瓦斯体积分数开始急剧上升,在距离回风巷20 m以内的工作面瓦斯体积分数均大于1%,在工作面和回风巷的交

界处更是达到极大值3%,整个回风巷内部的瓦斯体积分数达到2.3%。U型通风的上隅角瓦斯超限问题十分严重。

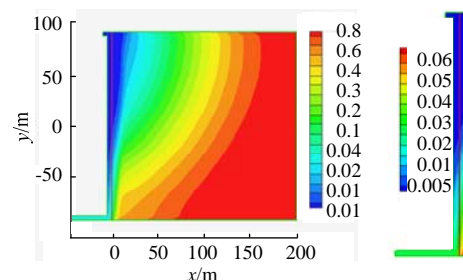


图3 U型通风瓦斯体积分数分布
(Z=2, 风量1 890 m³/min)

Fig.3 Gas flow fields of U-type ventilation system
(air volume 1 890 m³/min)

图4为“多源一汇”偏W型通风系统Z=2平面的瓦斯体积分数分布图,距工作面20 m以外的采空区瓦斯分布规律和U型通风一致;距工作面0~20 m段的采空区瓦斯体积分数变化较为剧烈,且漏风汇出现在中间回风巷附近,这是两进一回偏W通风系统作用的结果,运输巷和轨道巷同时进风,漏入采空区的2股风流在回风巷负压的驱动下,同时由回风巷附近汇聚流出,形成漏风汇,采空区上隅角也从轨道巷附近转移到中间回风巷附近;在工作面内,由于较低的回风巷负压,使得漏风源漏风减少,在漏风汇处携带的瓦斯也相对减少,同时2个巷道进风,等同于供风量增大1倍,也使得瓦斯被更多的新鲜风流稀释,从左侧的工作面局部放大图可以看出,工作面整体处于新鲜风流下,只有在回风巷附近瓦斯体积分数才开始上升,瓦斯体积分数最大值为0.8%,回风巷瓦斯体积分数为0.4%,没有出现工作面瓦斯超限问题。“多源一汇”偏W型通风系统相对于传统的U型通风系统,对解决工作面上隅角瓦斯超限问题有着明显的优势。

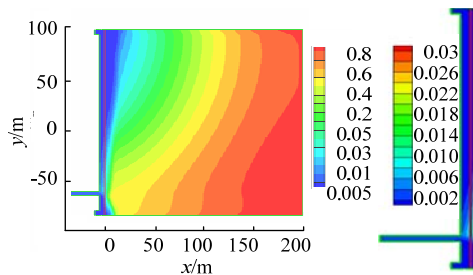


图4 偏W型通风瓦斯体积分数分布(Z=2, 运输巷进风量1 565 m³/min, 轨道巷进风量为756 m³/min)

Fig.4 Gas flow fields of partial W-type ventilation system
(air volume of haulage roadway 1 565 m³/min, air volume of track roadway 756 m³/min)

3 偏 W 型通风系统工作面参数优化研究

如图 1 所示的偏 W 型通风系统,其回风巷与轨道之间留有一定宽度的煤柱,对该段小煤柱采用沿顶板开采留底煤的方式。显然,煤柱宽度越小,底煤损失越小,煤炭回收率越高,但煤柱宽度过小,在巷道掘进和开采的过程中,小煤柱在巷道开挖导致的应力集中和工作面开采时前方超前支承压力作用下将无法保持稳定,因此,确定合理煤柱尺寸是保证偏 W 型通风系统安全高效关键问题。下面以巷道围岩应力与位移特征及工作面前方煤壁破坏规律作为指标,通过设定不同的煤柱宽度,研究掘进和开采过程中回风巷围岩活动规律及开采过程中工作面前方煤柱煤壁的破坏规律,对巷道布置参数进行优化研究,最终确定合理的方案。

3.1 模型设计

数值模拟几何模型以段王煤矿某综放工作面为原型,回采 9[#]煤层,煤层埋深 217 m,煤层倾角平均 11°,平均煤厚 4.43 m;模型倾向长度 250 m,走向长度 300 m。共模拟 7 层,自下而上分别为基本底、直接底、9 煤、直接顶、基本顶和顶部岩层,煤系地层岩性特征及力学参数如表 1、2 所示,力学模型采用摩尔-库仑模型。整个过程采用 FLAC^{3D} 软件进行模拟计算^[8-10]。

表 1 煤层顶底板
Table 1 Roof and floor of coal seam

类别	分项	主要岩石	厚度/m	岩性特征
顶板	基本顶	砂质泥岩	3.30	灰色,裂隙比较发育,底部岩石渐粗,具滑面
	直接顶	粉砂岩	3.69	灰色,质不均,岩性为互层状,裂隙发育
底板	直接底	粉砂岩	1.60	灰色,不均一,上部夹 0.2 m 细砂岩,层面有植物印痕
	基本底	细砂岩	3.93	灰色,厚层状,缓波状层理,上部夹 0.45 m 的粉砂岩

表 2 各岩层的力学参数
Table 2 Mechanical parameter of each stratum

岩性	容重/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
泥岩	2 600	4.65	0.21	1.7	32	0.5
细砂岩	2 470	30.25	0.20	5.2	42	2.3
粉砂岩	2 500	28.0	0.21	4.5	42	1.6
9 煤	1 350	3.8	0.21	1.08	20	9.8
粉砂岩	2 500	28.0	0.21	4.5	42	1.6
砂质泥岩	2 420	4.78	0.16	2.16	38	1.0
泥岩	2 600	4.65	0.21	1.7	32	0.5

3.2 方案设置

为确定偏 W 型通风方式下小煤柱合理尺寸,在其他因素和条件完全相同的情况下,提出了 4 种煤柱留设方案:方案一,煤柱宽度 5 m;方案二,煤柱宽度 10 m;方案三,煤柱宽度 15 m;方案四,煤柱宽度 20 m。采用三维有限差分法对上述各方案进行数值模拟,研究回风巷掘进和工作面开采 2 个阶段的巷道围岩活动规律和煤柱稳定特征,并最终得出合理煤柱尺寸。

3.3 模拟结果及其分析

1) 掘进期间

图 5 表明各方案煤柱上的应力分布均呈“马鞍形”,其中 5 m 时煤柱应力较集中,侧向应力峰值位于相邻巷道帮附近,且峰值之间的距离较小,应力核区形成平台,此种“平台型”垂直应力分布形态是煤柱失稳的临界状态^[11],核区中心应力稍有上升煤柱将迅速失稳,此时煤柱将处于不稳定状态。留设煤柱宽度 10 m 时弹性核区宽度为 4.9 m,15 m 时为 6.3 m,20 m 时为 8.7 m,弹性核区宽度依次增加,可有效增加煤柱的稳定性。煤柱宽度 20 m 时煤柱应力较小,且应力分布较均匀。

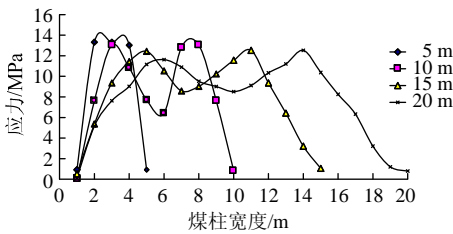


图 5 煤柱的垂直应力方向应力分布曲线
Fig.5 Vertical stress distribution curve of pillar

2) 回采期间各煤柱留设方案煤壁破坏规律

研究不同煤柱尺寸留设方案对工作面前方煤壁的影响,可通过煤壁应力和塑性区范围随煤柱尺寸的变化规律来反映。在此过程中,其他因素与上述研究巷道围岩规律的因素保持一致。

由图 6 可看出,随着煤柱尺寸增加,煤柱内应力峰值的位置由煤壁深部逐渐向外部发展,最大应力集中系数逐渐增大,煤柱宽度为 5,15 m 时最大应力集中系数分别为 2.50、2.58。煤柱宽度为 5,10,15,20 m 时,对应应力峰值位置距煤壁分别为 9,6,4,3 m 左右,最大应力分别为 13.56,13.89,14.01,14.37 MPa。这是由于随着煤柱宽度增大,煤柱承载能力提高,极限平衡区宽度将减小,即煤壁片帮危险性降低。

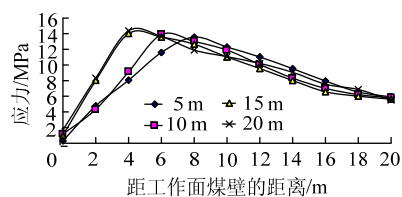


图6 不同煤柱尺寸煤壁垂直应力分布曲线

Fig.6 Vertical stress distribution curve of rib with different pillar

留设的煤柱尺寸不同,煤壁塑性区范围也不同。随着煤柱宽度的增大,煤壁塑性区范围有逐渐由大到小的趋势,煤柱宽度为5 m时塑性区最大,最大发展深度为12 m;煤柱宽度为10 m时,塑性区最大发育深度为6 m;煤柱宽度为15 m和20 m时,塑性区最大发育深度均为4 m左右,这与图6中的应力峰值位置相对应。煤柱宽度为5 m和10 m时工作面前方煤壁破坏范围明显大于其他2种方案,这是由于前期巷道掘进时,5 m和10 m煤柱应力集中系数较高且属“平台型”应力集中,在回采过程中,煤柱又受到超前支承压力的作用,两者在煤柱内形成叠加,导致塑性破坏的范围明显增大。这

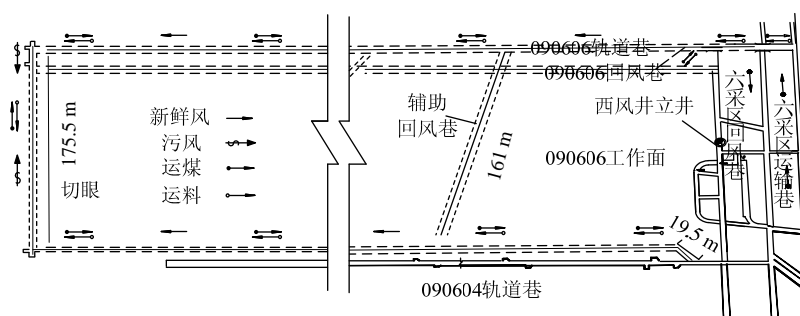


图7 工作面巷道平面布置

Fig.7 Plain layout of working face roadway

放顶煤回采期间进行了瓦斯体积分数观测,与相邻U型通风工作面上隅角瓦斯监测数据对比结果如图8所示。偏W型通风上隅角瓦斯体积分数明显低于U型通风方式,偏W型工作面回风巷附近瓦斯体积分数最大,平均瓦斯体积分数为0.85%,回风流瓦斯体积分数为0.45%~0.65%,工作面上隅角和回风巷风流瓦斯均未超限,与数值模拟结果吻合。对偏W型通风系统煤柱进行深部位移观测,结果如图9所示,随着距离工作面越来越近,各基点位移明显增大,其中,0~2 m段的煤体位移量最大,距离工作面4 m时,累计位移量达到160 mm,煤体破碎严重,0~2 m段的煤体已处于塑性区,不具有承载能力;2~4 m段煤体位移量较小,距离工作面4 m时,累计位移量为50 mm,煤体完整性较

一结果表明当煤柱宽度增加到15 m以后,塑性区范围并不再随着煤柱宽度的增加而发生明显变化,表明煤柱宽度15 m是能够保证安全开采的,因此,确定段王矿该综放面煤柱留设宽度为15 m。

4 偏W型通风系统现场应用

对段王煤矿某工作面应用了偏W型通风系统,该工作面所采煤层为9煤,其瓦斯含量为8.25~13.713 m³/t,该煤层结构简单,煤层倾角为1°~20°,巷道在掘进过程中,经实测煤层平均厚度为4.43 m。煤层赋存稳定,煤层顶部为0.3 m劣质煤,中间夹石为炭质泥岩,含炭量较高。工作面可采走向长度为630 m,倾斜长度173 m,如图7,工作面采用走向长壁布置,胶带巷、回风巷、轨道巷、开切眼沿煤层顶板布置,由胶带巷和轨道巷进新鲜风,清洗工作面后污风经回风巷流出,轨道巷与回风巷之间煤柱留设15 m。工作面回风巷至运输巷卧底放顶煤,两采一放,而回采回风巷与轨道巷之间煤柱时,支架沿顶板支设,只回收顶煤留底煤。

好,煤体具有承载力;4~6 m段煤体的位移量较小,在临近工作面时才出现一定的位移,可以判定该段煤体依然处于弹性区,煤体具有承载能力。观测表明偏W型通风留设的15 m宽煤柱变形量小,煤柱较稳定,回采煤柱时也未发生片帮冒顶事故,实现了综放面的安全高效生产。

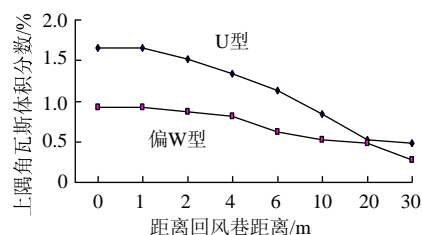


图8 上隅角不同位置瓦斯监测体积分数

Fig.8 Upper corner gas monitor density of different positions

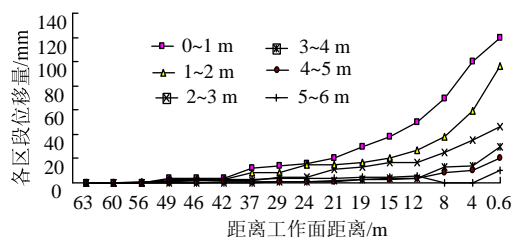


图 9 偏 W 型通风系统煤柱深部位移量图

Fig.9 Coal pillar deep displacement of partial W type ventilation system

5 结 论

1) 提出了一种偏 W 型通风系统, 其布置特点为: 在采煤工作面的下侧布置运输巷, 采煤工作面的上侧顺序布置相互平行的轨道巷和回风巷, 回风巷布置在距离轨道巷较近的工作面上部; 轨道巷和运输巷同时兼作进风巷道; 轨道巷与回风巷之间留有一定宽度煤柱, 风流行程形成偏 W 型。

2) 针对高瓦斯综放工作面, 与 U 型通风相比, 采用偏 W 型通风时, 工作面、回风流、上隅角瓦斯体积分数明显降低, 不会出现瓦斯超限, 可保证工作面的安全开采。

3) 提出了 5, 10, 15 和 20 m 这 4 种煤柱方案, 采用数值模拟对各个方案进行了研究, 重点对掘进期间、回采期间应力和位移特征和开采过程中前方煤壁的破坏规律进行了比较研究。研究结果表明: 当煤柱宽度增加到 15 m 以后, 塑性区范围并不再随着煤柱宽度的增加而发生明显变化, 因此, 煤柱宽度 15 m 是能够保证安全开采的。

4) 现场应用表明: 偏 W 型通风系统可有效降低工作面、回风流和上隅角瓦斯体积分数, 研究提出的 15 m 煤柱留设方案, 保持了煤柱在掘进和回采期间的稳定性, 实现了综放面的安全高效生产。该通风系统可为其他高瓦斯综放面安全高效开采提供一条新的技术途径。

参考文献:

[1] 俞启香, 王凯, 杨胜强. 中国采煤工作面瓦斯涌出规律及其控制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 9-14.
YU Qixiang, WANG Kai, YANG Shengqiang. Study on pattern and control of gas emission at coal face in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 9-14.

[2] 张锋刚. U+L+I 型通风治理综采工作面回风隅角瓦斯[J]. 煤, 2012(4): 35, 65.
ZHANG Fenggang. Return current and upper corner gas

control of fully-mechanized face with U+L+I type ventilation system[J]. Coal, 2012(4): 35, 65.

- [3] 袁亮. 低透气性高瓦斯煤层群无煤柱快速留巷 Y 型通风煤与瓦斯共采关键技术[J]. 中国煤炭, 2008(6): 9-13.
YUAN Liang. Key technology for simultaneous extraction of coal/gas in low permeable high gas content coal seam cluster under pillarless gob-side entry retained with Y type ventilation[J]. China Coal, 2008(6): 9-13.
- [4] 朱建芳, 秦跃平, 张金锋. 高瓦斯回采工作面 W 型通风方式的实践[J]. 煤矿安全, 2004, 35(2): 18-20.
ZHU Jianfang, QIN Yueping, ZHANG Jinfeng. Practice of W-type ventilation in high gassy coal mining face[J]. Safety in Coal Mines, 2004, 35(2): 18-20.
- [5] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 133-142.
- [6] 林柏泉, 张仁贵. U 型通风工作面采空区瓦斯涌出及其治理[J]. 煤炭学报, 1998, 23(2): 156-158.
LIN Baiquan, ZHANG Rengui. Methane emission from the mined-out area and its control in a face with U type air ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(2): 156-158.
- [7] 许满贵, 林海飞, 潘宏宇. 综采采空区瓦斯运移规律及抽采研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2010, 25(2): 6-9.
XU Mangui, LIN Haifei, PAN Hongyu. Numerical study of gas migration in mechanized mining gob[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 25(2): 6-9.
- [8] 王永革, 肖辉赞. 大采高工作面区段煤柱合理尺寸的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2011, 30(5): 645-648.
WANG Yongge, XIAO Huizan. Numerical simulation on reasonable size of section coal pillar in the face of big mining height[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2011, 30(5): 645-648.
- [9] 郑百生, 谢文兵, 窦林名, 等. 不规则煤柱作用下工作面开采的三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 137-140.
ZHENG Baisheng, XIE Wenbing, DOU Linming, et al. 3D simulation on caving of face affected by irregular pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 137-140.
- [10] 宋振骐, 梁盛开, 汤建泉, 等. 综采工作面煤壁片帮影响因素研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2011, 26(1): 1-4.
SONG Zhenqi, LIANG Shengkai, TANG Jianquan, et al. Study on the influencing factors of coal wall rib spalling in fully mechanized working face[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2011, 26(1): 1-4.
- [11] 吴立新, 王金庄, 郭增长. 煤柱设计与监测基础[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 34-64.