

文章编号:0253-9993(2012)10-1682-06

近距离高瓦斯煤层群大采高首采层煤与瓦斯共采

薛俊华^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;2. 深部煤炭开采与环境保护国家重点实验室,安徽 淮南 232001)

摘 要:针对我国西部地区典型的近距离高瓦斯厚煤层大采高条件下开采扰动剧烈、沿空留巷难度大、上下向扰动卸压范围更大等煤气共采的技术难题,采用理论研究及数值分析的方法,在研究 4.2 m 大采高顶板裂隙发育及演化规律的基础上,揭示大采高工作面裂隙发育区的分布特征,找到了采空区瓦斯富集区,并提出采用大直径($\phi=250$ mm)钻孔群代替倾向高抽巷实现卸压瓦斯的高效抽采,安全连续高效生产原煤 67.7 万 t,抽采瓦斯累计 1 166.95 万 m³。

关键词:煤与瓦斯共采;高瓦斯;近距离煤层群;大采高;顶板裂隙发育规律;大直径钻孔群

中图分类号:TD712.6 **文献标志码:**A

Integrated coal and gas extraction in mining the first seam with a high cutting height in multiple gassy seams of short intervals

XUE Jun-hua^{1,2}

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory of Deep Coal Mining & Environment Protection, Huainan 232001, China)

Abstract: There are a number of challenging technical issues in mining the first seam with a high cutting single pass longwall method in thick and multiple gassy seams of short intervals in the western region of China. These issues include the stability of retained gateroads and the quantification of the extent and degree of distressed zones in surrounding strata. To gain an insight of these issues, a theoretical and numerical study was undertaken for a 4.2 m cutting height face to understand the propagation and evolution of fractures around the face, to characterize the fracture distribution, and to map out the zones of high gas concentrations in the goaf. Based on these findings, a group of large diameter ($\phi=250$ mm) boreholes drilled into the zones, instead of conventionally expensive gas drainage tunnels, are successfully used to capture the goaf gas. A total of 11.669 5 million cubic meters gas is captured with the boreholes, a total of 677 000 tons of coal is efficiently extracted without any gas issue, and integrated coal and gas extraction is achieved.

Key words: simultaneous extraction of coal and gas; high gas; short-distance coal seams group; large mining height; roof cracks development law; large diameter boreholes group

中国是世界第一产煤大国,煤炭产量占世界的 37%,煤炭作为我国的主要能源,分别占一次能源生产和消费总量的 76% 和 69%。我国煤矿大多为高瓦斯煤层群开采,特征为“三高一低”,80% 以上重大恶性事故与瓦斯有关,目前瓦斯灾害事故防治是煤矿安全工作的重中之重^[1-3]。以“低透气性煤层群无煤柱

沿空留巷 Y 型通风煤与瓦斯共采技术”为代表的煤与瓦斯共采理论与技术取得重大突破,在薄及中厚煤层中推广应用效果显著,但厚煤层共采技术没有解决^[4-10]。对于 4 m 以上大采高工作面而言,开采扰动剧烈,留巷难,且上、下向扰动卸压范围更大,邻近层瓦斯大量涌入工作面,瓦斯控制难度大。

收稿日期:2012-02-01 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB735506);国家自然科学基金资助项目(50974002,41172147)

作者简介:薛俊华(1963—),男,江苏泰州人,教授级高级工程师,博士研究生。Tel:0554-7625616, E-mail: xuejunhua2003@163.com

针对我国西部地区典型的近距离煤层群高瓦斯、4.2 m 大采高、松软顶板工作面,本文在研究大采高顶板裂隙发育规律的基础上,采用沿空留巷二进一回的 Y 型通风方式,用大直径($\phi=250$ mm)钻孔群代替倾向高抽巷,并配合常规顺层孔、顶板走向钻孔及采空区埋管等瓦斯抽采技术,实现煤与瓦斯共采。

1 试验工作面概况

山西沙曲矿 24207 工作面回采是 3+4 号煤层,厚度 3.85~4.36 m,平均 4.20 m,瓦斯含量 11.72 m³/t,瓦斯压力 1.50 MPa,煤层透气性系数 3.524~3.785 m²/(MPa²·d)。2 号煤层上距 3+4 号煤层平均 20 m,平均厚度 1.04 m,瓦斯含量 10.65 m³/t,瓦斯压力 0.92 MPa,煤层透气性系数 2.12~2.17 m²/(MPa²·d);5 号煤层下距 3+4 号煤层平均 5.6 m,平均厚度 3.3 m,瓦斯含量 12.06 m³/t,瓦斯压力 1.40 MPa,煤层透气性系数 1.99~2.23 m²/(MPa²·d)。工作面直接顶为灰黑色中细砂质泥岩,厚度 5.5 m;基本顶为灰白色中砂岩,厚度 5.59 m;直接底为 1.1 m 的灰色中砂岩;基本底为 2.5 m 的黑色粉砂岩。工作面设计走向长度 1 663 m,倾向长度 220 m,工作面整体呈单斜构造,煤层走向 330°,倾角 4°~7°,平均倾角 5°。

2 大采高工作面顶板裂隙发育规律模拟

以沙曲矿 24207 工作面为原型,采用 FLAC^{3D} 软件^[11],建立受覆盖岩层重力作用下的三维空间力学模型。模型坐标系规定如下: x 轴为煤层走向方向, y 轴为煤层倾向方向, z 轴为垂直方向即重力方向。沿 x 轴方向长 600 m, y 轴方向长 400 m, z 轴方向高 150 m,模型底边即 $z=0$ 处到地面设定高度为 600 m,煤层倾角 5°,模型自下到上分为 16 组岩层,共划分 30 000 个单元体,33 201 个节点,3+4 号煤层为模拟的开采煤层,且划分为模型的第 7 层。

模型从 $x=50$ m 处开切眼,采高为 4.2 m,采煤工作面倾向长度为 220 m,模拟开采分为 6 个阶段,开采长度分别为 10,20,20,50,50,50 m,即从 $x=50$ m 处开采到 $x=250$ m 处,累计开采 200 m。模型计算采用莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则。

2.1 横向离层裂隙发育区

当工作面向前推进时,采空区上方上覆岩层将产生离层裂隙^[12],纵向位移可真实地反映岩层沉降而产生离层裂隙发育状况。图 1 为不同累计进尺时 $x=100$ m 切面上的竖向位移云图。

由图 1 可看出,在距离切眼 50 m ($x=100$ m) 的

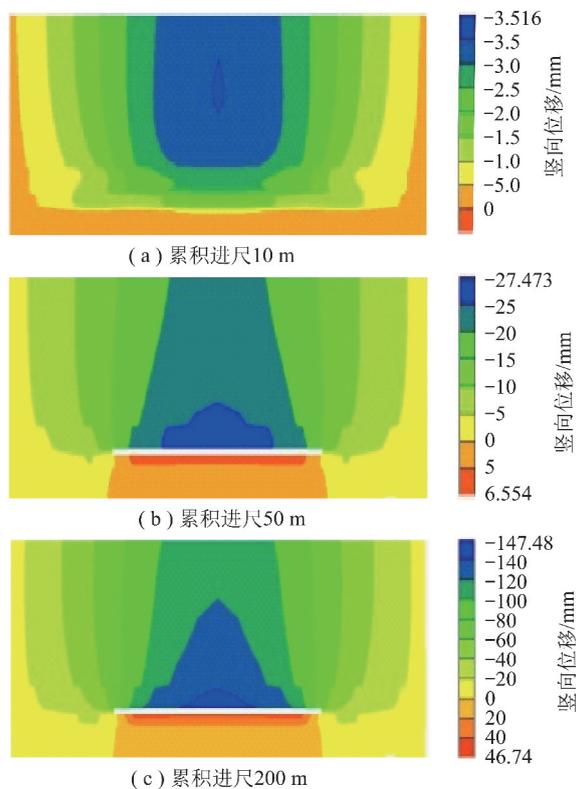


图 1 不同累计进尺时 $x=100$ m 切面上的竖向位移云图

Fig. 1 Nephograms of vertical shift on $x=100$ m plane with different accumulated footage

切面上,纵向位移场均呈不均匀沉降状态分布;每个阶段的开采过程中,该工作上的竖向位移最大值分别是 3.52,27.47 和 147.48 mm。随着工作面的推进和采动影响,在垂直方向上出现不均匀下沉,沉降量不同的岩层将伴随着横向裂隙发育。位移变化趋势与回采推进距离直接相关,而位移变化的大小与距开采煤层顶板的高度有关。工作面顶板裂隙的发育可以通过工作面顶板以上不同采高倍数的纵向位移随工作面推进的变化进行考察。

图 2 为工作面顶板以上,不同采高倍数的竖向位移随工作面推进的变化曲线。由图 2 可以看出,在距离切眼 10 m 切面($x=60$ m)上,当工作面累计推进 10 m 时,5~15 倍采高处沉降量比较均匀,几乎重合为一条曲线,也相对较小,沉降不明显,离层裂隙发育也不明显;当工作面累计推进 30 m 时,不同采高处开始呈不均匀沉降,随着工作面的推进,13,15 倍采高沉降曲线趋于重合,位于所有曲线上,而 5,7 倍采高的下沉曲线趋于重合,且位于所有曲线的下方,10 倍采高处纵向位移曲线位于所有曲线中间。

对比图 2 曲线的变化,可以判断在工作面顶板以上 10 倍采高处覆岩离层最明显,横向裂隙发育最剧烈;当工作面采过切面后,不同采高倍数处下沉的不均匀性才开始加剧,这是因为采空区顶板覆岩受采动

影响后应力场重新分布而逐渐被压实。

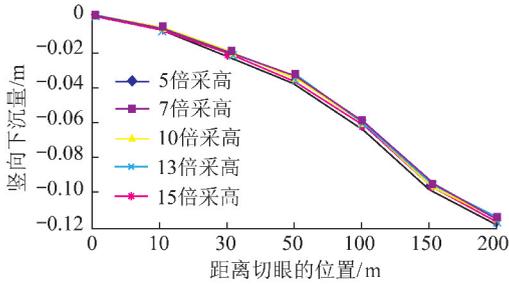


图 2 $x=60\text{ m}$ 的切面上,不同采高倍数的竖向位移随工作面推进的变化曲线

Fig. 2 Variation of vertical shift of different mining height on $x=60\text{ m}$ plane with advancement of the working face

2.2 纵向裂隙发育区

煤层开采后,卸压区内岩层以拉应力为主,当其超过岩体的极限抗拉强度时,便出现纵向裂隙,因此在顶板覆岩周期断裂时,煤壁前方顶板岩层内产生开口向上的纵向裂隙,在煤壁后方顶板岩层内产生开口向下的纵向裂隙^[13]。图 3 为顶板以上不同采高倍数处水平应力(倾向)随工作面推进的变化曲线。可以看出,13 和 15 倍采高区域,采前和采后水平应力(y 方向)始终保持受压状态,不会出现纵向裂隙;7 倍和 10 倍采高区域,随着工作面的推进,水平应力值(倾向)均由负变为正,说明应力从原始的受压变状态变为采动后的受拉状态,且最大水平应力为 3.80 MPa,模拟分为 16 层,顶板 7~10 倍各层最大抗拉强度极限为 1.8 MPa,故会产生纵向裂隙,考虑重力场重新分配,7 倍采高以下将随着工作面的推进而逐渐被压实,判定顶板以上 7~10 倍采高区域处于纵向裂隙最发育区。

综上所述,工作面顶板以上 10 倍采高区域,纵横裂隙发育剧烈且相互导通,成为良好的瓦斯运移通道,属于高瓦斯富集区域。抽采断裂带卸压瓦斯的钻孔最好布置在此区域附近。

3 24207 工作面卸压瓦斯治理技术

基于分源法^[14],预计 24207 工作面瓦斯相对涌出量 $19.88\text{ m}^3/\text{t}$ 、工作面日产 3 000 t 时的绝对瓦斯涌出量为 $41.42\text{ m}^3/\text{min}$,其中本煤层瓦斯涌出占 57%,邻近层瓦斯涌出占 43%。采用沿空留巷二进一回的 Y 型通风方式,试验大直径钻孔群代替倾向高抽巷,并配合常规顺层孔及采空区埋管等措施治理瓦斯,其中,治理工作面卸压瓦斯的主要方法如下:

(1)倾向高抽巷。24207 工作面设计布置高抽巷 7 条,距切眼 20 m 由回风巷布置第 1 高抽巷,其它高抽巷间距均为 100 m。高抽巷由回风巷沿走向往煤

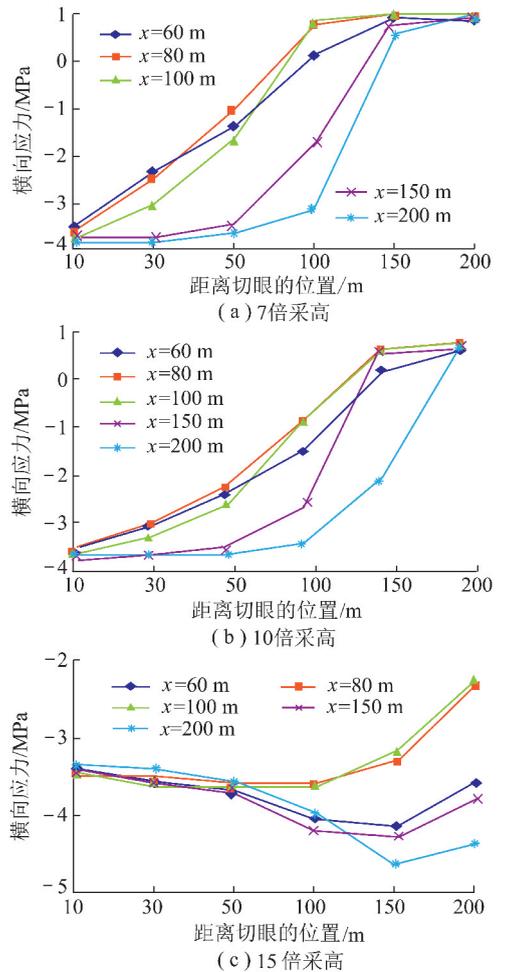


图 3 顶板以上不同采高倍数的区域水平应力(倾向)随工作面推进的变化曲线

Fig. 3 Variation of horizontal stress of different mining height with advance of the face

层顶板方向施工^[15],施工角度为 40° ,长度为 60 m (图 4),再沿倾向向被保护段施工 15 m,高抽巷为半圆拱断面,规格 2.4 m(宽) \times 2.4 m(高)。



图 4 高抽巷倾向剖面

Fig. 4 Section of high-located drainage roadway along seam

(2)大直径($\phi=250\text{ mm}$)钻孔群。24207 工作面原设计在专用回风巷(尾巷)中施工 15 条倾向高抽巷,为减少工程量,实际仅施工 7 条高抽巷,试验大直径钻孔群替代高抽巷以期实现断裂带卸压瓦斯高效抽采。

在未施工倾向高抽巷的位置,采用德国鲁尔矿山咨询与商贸有限公司生产的 ADR250 型钻机施工 9 组钻场,每组钻场 5 个钻孔,5 个终孔在同一水平,间距均为 15 m,直径为 250 mm,到胶带巷顶板的法向

距离最小为 40 m (10 倍采高)。图 5 为大直径钻孔施工示意 (1~5 号钻孔长度分别为:80,81,85,92,100 m)。

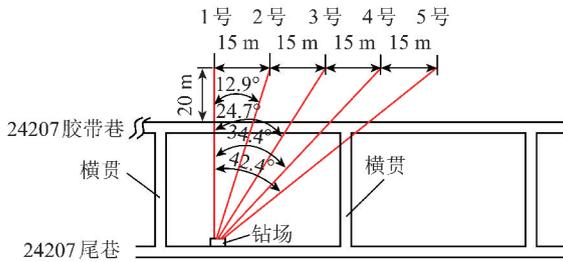


图 5 24207 回风巷大直径钻孔钻场布置示意

Fig. 5 Section of large diameter boreholes group

4 大采高快速留巷工作面煤与瓦斯共采工程实践

4.1 倾向高抽巷抽采实际效果

图 6 为 1 号倾向高抽巷抽采瓦斯的浓度和纯量随时间、工作面相对位置的变化情况。由图 6 可知,当工作面推过 1 号高抽巷 2.2 m 时,1 号高抽巷瓦斯浓度为 10%,平均纯量 3.77 m³/min;当工作面推过 1 号高抽巷 25.3 m 时,采空区顶板初次来压,1 号高抽巷抽采的瓦斯量和瓦斯浓度急剧增高,抽采的最大瓦斯浓度达 27%,瓦斯纯量高达 6.18 m³/min;随着工作面的持续推进,1 号高抽巷与工作面相对距离的增加,1 号高抽巷抽采的瓦斯量和瓦斯浓度逐渐缓慢下降,至工作面推过 1 号倾向高抽巷 102.7 m,1 号高抽巷仍在近 40 多天 (1 号高抽巷与工作面相对距离 110 m 以内) 保持较好的抽采效果,1 号高抽巷抽采的瓦斯浓度和纯量均在 10%,1 m³/min 以上,均能保持较好的抽采效果。

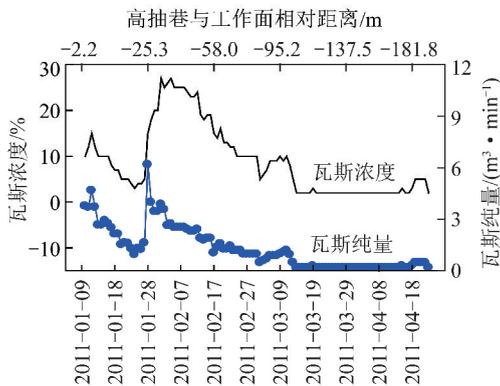


图 6 1 号高抽巷瓦斯抽采浓度和纯量随时间、工作面相对距离的变化曲线

Fig. 6 Relationship between gas concentration and quantity of No. 1 high located drainage roadway with time and relative distance of the working face

故单个倾向高抽巷的抽采影响范围为 100 ~ 110 m,确定倾向高抽巷有效抽采间距为 100 m。

4.2 大直径钻孔群抽采实际效果

图 7 为 24207 大直径钻孔群总抽采纯量与采空区埋管、留巷回风流中瓦斯浓度变化关系。

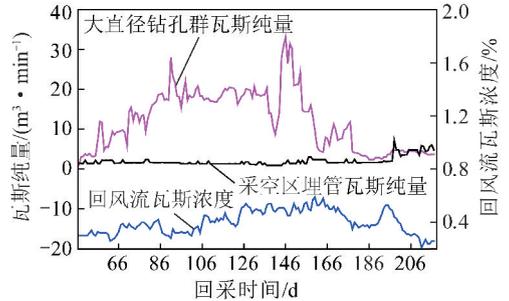


图 7 大直径钻孔群总抽采纯量与采空区埋管、回风流瓦斯浓度变化关系

Fig. 7 Relationship between gas drainage volume of large diameter borehole groups, pipe buried in goaf and gas concentration of return current

由图 7 可以看出:① 24207 工作面回采期间,大直径钻孔群抽采瓦斯效率高,总瓦斯抽采纯量平均为 12.13 m³/min,最高达 33.14 m³/min,远大于 1 号倾向高抽巷抽采瓦斯的最高值 6.18 m³/min;② 在有效抽采范围内,大直径钻孔单孔平均抽采纯量为 1.5 m³/min,平均抽采浓度超过 20%;③ 单一大直径钻孔钻场 5 个高位抽采采空区顶板断裂带富集区瓦斯钻孔的均匀布置 (较单一倾向高抽巷的单线布置),抽采效果明显提高,由上邻近层和断裂带向采空区涌出的瓦斯量大大减小,导致采空区埋管抽采的瓦斯纯量大幅降低,实测采空区埋管抽采的平均瓦斯浓度 3%,平均纯量 1.5 m³/min;④ 通过大直径钻孔群和采空区埋管的结合,高效抽采采空区顶板断裂带富集瓦斯和采空区的瓦斯,有效控制采动 (空) 区瓦斯涌入采煤工作面和回风流中,工作面回风流中瓦斯浓度均在 0.6% 以下,瓦斯综合治理效果显著,故采用大直径钻孔群可替代倾向高抽巷高效抽采断裂带卸压瓦斯。

5 煤与瓦斯共采效果

5.1 工作面空间瓦斯浓度

24207 工作面在第 10,30,50,70,90 支架安设 5 个甲烷传感器;沿空留巷段距工作面后方 ≤10 m 范围内安设甲烷传感器 T₁;回风巷中部安设甲烷传感器 T₂;在回风斜巷距风流汇合点 10~15 m 范围内安设混合探头 T₃,进行工作面瓦斯浓度监控。

图 8 为 24207 工作面空间瓦斯浓度随时间变化

情况。实施“Y”型通风后,瓦斯监控探头 T_1 平均浓度为 0.38%, T_2 和 T_3 均为 0.49%, 10 号架间瓦斯平均浓度为 0.37%, 50 号架间平均瓦斯浓度为 0.32%, 90 号架间平均瓦斯浓度为 0.27%, 均小于 0.6%。

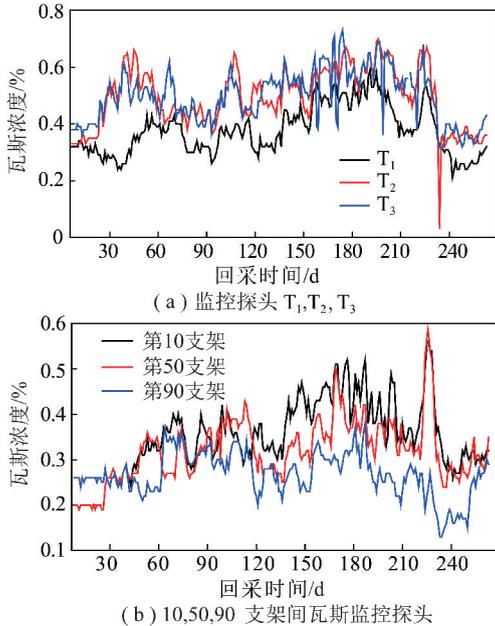


图 8 24207 工作面空间瓦斯浓度随时间的变化
Fig. 8 Variation of gas concentration of working face 24207 with mining time

5.2 工作面瓦斯涌出情况

图 9 为 24207 工作面瓦斯涌出随时间变化情况。整个工作面回采期间,总瓦斯涌出量在 $20.76 \sim 78.52 \text{ m}^3/\text{min}$, 平均 $42.35 \text{ m}^3/\text{min}$ 。其中,风排瓦斯量在 $6.33 \sim 15.69 \text{ m}^3/\text{min}$, 平均 $11.53 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

24207 工作面抽采瓦斯总混合量在 $34.73 \sim 258.79 \text{ m}^3/\text{min}$, 平均 $177.97 \text{ m}^3/\text{min}$, 纯量在 $9.14 \sim 66.51 \text{ m}^3/\text{min}$, 平均 $30.81 \text{ m}^3/\text{min}$, 工作面瓦斯平均抽采率为 71.20%。4 趟抽采管路瓦斯纯量大小顺序为:回风巷>轨道巷>采空区埋管>胶带巷。整个工作面回采期间,以回风巷管路(大直径钻孔群)抽采卸压瓦斯为主,占抽采总量的 51.45%。

5.3 工作面产量

图 10 为 24207 工作面的日产量和累计进尺变化情况。可知,24207 工作面最大日进尺 3.9 m, 最大日产量 5 200 t (2011-07-23), 平均日进尺 2.4 m, 截至 2011-08-31, 24207 工作面累计总进尺 507.6 m, 累计生产原煤 67.7 万 t, 抽采瓦斯累计 1 166.95 万 m^3 , 实现了煤与瓦斯共采及安全高效回采。

6 结 论

(1) 采用 FLAC^{3D} 软件, 模拟了大采高工作面采

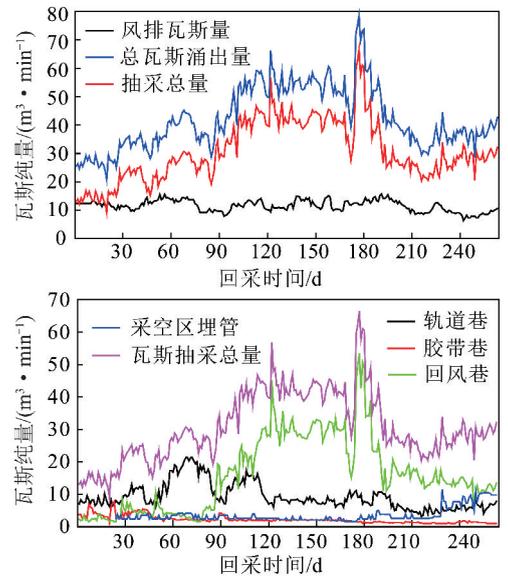


图 9 24207 工作面总瓦斯涌出量随时间变化
Fig. 9 Variation of total gas drainage volume of working face 24207 with mining time

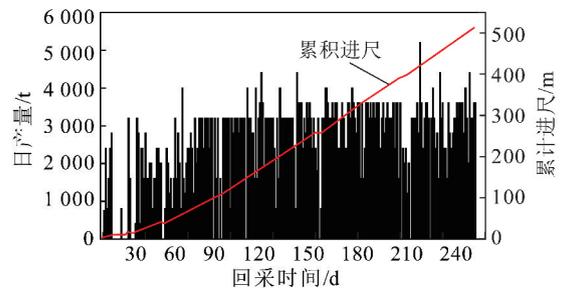


图 10 工作面日产量与累计进尺随时间的变化
Fig. 10 Relationship of day output and accumulative footage with mining time

动上覆岩层移动及裂隙发育规律, 得出竖向位移场均呈现不均匀沉降状态分布, 顶板以上 10 倍采高处离层明显, 横向裂隙最发育; 工作面顶板以上 7~10 倍采高处以拉应力为主, 在顶板覆岩周期断裂时顶板岩层内产生纵向裂隙。工作面顶板以上 10 倍采高处, 纵横裂隙发育剧烈且相互导通, 成为良好的瓦斯运移通道, 属于高瓦斯富集区域。

(2) 研究了近距离高瓦斯煤层群大直径 ($\phi = 250 \text{ mm}$) 倾向钻孔群的抽采效果, 抽采纯量最高达 $33.14 \text{ m}^3/\text{min}$, 可替代高抽巷实现断裂带卸压瓦斯的高效抽采, 工作面回风流中瓦斯浓度在 0.6% 以下。

(3) 提出了大直径倾向钻孔群瓦斯抽采技术, 配合常规顺层孔、顶板走向钻孔及采空区埋管等瓦斯抽采技术, 实现了工作面平均瓦斯抽采率 71.20%, 取得了显著的经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] 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):128-131.
- Yu Qixiang, Cheng Yuanping, Jiang Chenglin, et al. Principles and applications of exploitation of coal and pressure relief gas in thick and high-gas seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2004,33(2):128-131.
- [2] 袁 亮. 远松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
- Yuan Liang. Theory and technology of gas drainage and capture in soft multiple coal seams of low permeability [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,2004.
- [3] 程远平,付建华,俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-139.
- Cheng Yuanping, Fu Jianhua, Yu Qixiang. Development of gas extraction technology in coal mines of China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2009,26(2):127-139.
- [4] 卢 平,袁 亮,程 桦,等. 低透气性煤层群高瓦斯采煤工作面强化抽采卸压瓦斯机理及试验[J]. 煤炭学报,2010,35(4):580-585.
- Lu Ping, Yuan Liang, Cheng Hua, et al. Theory and experimental studies of enhanced gas drainage in the high gas of low permeability coal multi-seams[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(4):580-585.
- [5] 袁 亮. 低透气煤层群首采关键层卸压开采采空侧瓦斯分布特征与抽采技术[J]. 煤炭学报,2008,33(12):1362-1367.
- Yuan Liang. Gas distribution of the mined-out side and extraction technology of first mined key seam relief-mining in gassy multi-seams of low permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (12):1362-1367.
- [6] 袁 亮. 高瓦斯矿区复杂地质条件安全高效开采关键技术[J]. 煤炭学报,2006,31(2):174-178.
- Yuan Liang. Key technique of safe and high efficiency mining in highly gassy mining area with complex geologic conditions[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(2):174-178.
- [7] 袁 亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1370-1379.
- Yuan Liang. Key technology of safe mining of low permeability and methane-rich seam group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(7):1370-1379.
- [8] 袁 亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术[J]. 煤炭学报,2008,33(8):898-902.
- Yuan Liang. Technology of simultaneous extraction of coal and gas with boreholes drilled in retained roadway [J]. Journal of China Coal Society,2008,33(8):898-902.
- [9] 袁 亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报,2009,34(1):1-8.
- Yuan Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(1):1-8.
- [10] 袁 亮. 煤与瓦斯共采:领跑煤炭科学开采[N]. 科学时报,2011-02-21(B1).
- Yuan Liang. Simultaneous extraction of coal and gas; take the lead of coal science extraction[N]. Science Times,2011-02-21(B1).
- [11] 李 围. 隧道及地下工程FLAC解析方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009:99-259.
- [12] 钱鸣高,许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”型圈特征研究[J]. 煤炭学报,1998,23(5):466-469.
- Qian Minggao, Xu Jialin. Study on the “O shape” circle distribution characteristics of mining induced fractures in the overlaying strata [J]. Journal of China Coal Society,1998,23(5):466-469.
- [13] 卢 平,刘泽功,廖光焯,等. 高瓦斯综采面顶板覆岩卸压抽放瓦斯试验研究[J]. 力学与实践,2003,25(4):53-56.
- Lu Ping, Liu Zegong, Liao Guangxuan, et al. Methane drainage experimental research for the stress-relief roof stratum of working face of high gas coal seam [J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25 (4):53-56.
- [14] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1992:95-105.
- Yu Qixiang. Mine gas prevention and control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press,1992:95-105.
- [15] 张英华,尹根成,黄志安. 近距离高瓦斯煤层群倾斜高抽技术的应用研究[J]. 北京科技大学学报,2006,28(3):219-222.
- Zhang Yinghua, Yin Gencheng, Huang Zhian. Application research on the technology of incline high-position alley pumping in multi-coal-seam with close quarters and high-content methane [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2006,28(3):219-222.