

文章编号: 1671-251X(2022)10-0116-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.17966

深埋藏高应力顺层水力冲孔煤体卸压规律及应用

张建国¹, 翟成²

(1. 中国平煤神马能源化工集团有限责任公司, 河南 平顶山 467000;
2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为解决煤矿深部开采工作面煤与瓦斯突出危险性高的问题, 以首山一矿12090工作面为工程背景, 采用数值模拟方法分析了深埋藏高应力环境下采煤工作面顺层水力冲孔后的煤体变形和应力变化规律, 得出结论: 水力冲孔孔洞周围煤体朝向孔洞变形, 有利于煤体内的裂隙发育和导通, 进而提高煤体渗透率; 冲孔区域煤体的水平应力有效降低, 各冲孔孔洞形成的卸压区域相互连通, 形成卸压条带, 有利于瓦斯迁移与抽采。依据数值模拟结果并结合实际工程, 确定了首山一矿12090工作面水力冲孔工程方案: 上帮钻孔角度为5~6°, 下帮钻孔角度为-5~-4°; 钻孔间距为4 m, 每个冲孔孔洞长度为1 m, 每个钻孔的冲孔孔洞间距为7 m, 距巷帮30 m范围内不进行冲孔作业; 冲孔水压为5~6 MPa, 流量为120~160 L/min。实践表明: 采用该方案后, 每月成孔数达40个, 成孔率达80%; 冲孔钻孔瓦斯抽采浓度高、衰减慢, 抽采50 d后冲孔钻孔内瓦斯体积分数为40%~60%, 为普通钻孔的2~3倍, 抽采120 d后冲孔钻孔内瓦斯体积分数仍有20%, 水力冲孔有效提高了瓦斯抽采效果, 降低了煤层瓦斯含量; 回风流平均瓦斯体积分数降至0.5%以下; 工作面平均日进尺由2.4 m增加至3.2 m, 提高了生产率。

关键词: 煤与瓦斯突出; 瓦斯抽采; 水力冲孔; 煤体变形; 煤体卸压; 煤层致裂增透

中图分类号: TD712

文献标志码: A

Pressure relief law and application of deep-buried high-stress bedding coal by hydraulic flushing

ZHANG Jianguo¹, ZHAI Cheng²

(1. China Pingmei Shenma Energy and Chemical Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China;
2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the problem of the high risk of coal and gas outburst in deep coal working face, taking 12090 working face of Shoushan No.1 Coal Mine as the engineering background, the paper analyzes the deformation and stress variation law of coal body after hydraulic flushing in coal working face under deep-buried and high-stress environment by numerical simulation method. The conclusions are listed as follows. The coal body around the hydraulic flushing hole deforms towards the hole, which is conducive to the development and conduction of cracks in the coal body, thus improving the permeability of the coal body. The horizontal stress of the coal body in the flushing area is effectively reduced. The pressure relief areas formed by each punching hole are interconnected to form a pressure relief strip, which is conducive to gas migration and extraction. According to the numerical simulation results and the actual project, the hydraulic flushing project scheme of 12090 working face in Shoushan No. 1 Coal Mine is determined. The upper side drilling angle is 5-6°, and the lower side drilling

收稿日期: 2022-07-10; 修回日期: 2022-10-05; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51925404); 国家自然科学基金面上项目(51774278)。

作者简介: 张建国(1965—), 男, 河南滑县人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事深部矿井瓦斯防治体系研究工作, E-mail: zhangjg_z@126.com。通信作者: 翟成(1978—), 男, 山东滕州人, 教授, 博士, 主要从事低透气性煤层致裂增透及矿井瓦斯灾害防治等方面的研究工作, E-mail: greatzc@cumt.edu.cn。

引用格式: 张建国, 翟成. 深埋藏高应力顺层水力冲孔煤体卸压规律及应用[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 116-122, 141.

ZHANG Jianguo, ZHAI Cheng. Pressure relief law and application of deep-buried high-stress bedding coal by hydraulic flushing[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(10): 116-122, 141.



扫码移动阅读

angle is $-5\text{--}4^\circ$. The drilling spacing is 4 m, and the length of each punching hole is 1 m. The spacing of flushing holes in each borehole is 7 m, and no flushing operation is carried out within 30 m from the roadway side. The flushing water pressure is 5-6 MPa, and the flow rate is 120-160 L/min. The practice shows that after adopting this scheme, the number of holes completed per month reaches 40 and the completion rate reaches 80%. The gas extraction concentration in the flushing hole is high and the gas attenuation is slow. After 50 days of extraction, the gas volume fraction in the flushing hole is 40%-60%, which is 2-3 times of that in the ordinary hole. After 120 days of extraction, the gas volume fraction in the flushing hole is still 20%. Hydraulic flushing effectively improves the gas extraction effect and reduces the gas content in coal seams. The average gas volume fraction of return air flow decreases to below 0.5%. The average daily footage of the working face increases from 2.4 m to 3.2 m, which improves productivity.

Key words: coal and gas outburst; gas extraction; hydraulic flushing; coal deformation; coal body pressure relief; coal seam crack and permeability increase

0 引言

我国煤矿已进入深部开采阶段,煤层开采普遍面临瓦斯含量大、应力高问题^[1-3],且深部煤层渗透率普遍较低^[4-5],导致瓦斯抽采困难,煤与瓦斯突出危险性高。煤体卸压是提高瓦斯抽采效果的重要因素。普通瓦斯抽采钻孔有效影响半径小,瓦斯抽采效率低,打钻工作量大^[6-7]。为提高煤体卸压效果,改善煤层渗透性能,低温流体冲击、微波、声波、静态破碎剂、高压电脉冲等^[8-13]煤层致裂方法不断提出,二氧化碳驱替^[14-15]也为煤层瓦斯治理提供了新思路。然而,受装备技术水平、施工作业条件等因素影响,上述方法多处在基础研究阶段,在实际工程中尚无广泛应用。

相比之下,以水力压裂、水力冲孔、水力割缝为主的水力化方法技术成熟、装备完善,是目前煤矿应用最广泛的煤层致裂增透方法^[16]。水力化方法在不断总结中得到创新和发展:Xu Jizhao 等^[17]在水力压裂的基础上,研究了脉动水压在煤体中的传播规律,发现脉动水压在裂纹尖端产生应力叠加,可显著降低煤体的起裂压力;Zhang Rong 等^[18]分析了煤层瓦斯流动特征,利用 COMSOL Multi-Physics 数值模拟软件优化了水力冲孔的钻孔布置形式;刘明举等^[19]利用底板岩巷穿层钻孔技术对上部煤层进行水力冲孔,使得新安煤矿的煤层渗透率和瓦斯抽采量提高了10倍以上。

工作面顺层水力冲孔煤层增透技术是由工作面煤巷向煤层内打顺层钻孔,如图1所示。钻孔长度一般达几十米至上百米。每个钻孔间隔一段距离进行一次冲孔作业,在煤层内形成孔洞,冲孔孔洞周围煤体在应力作用下发生形变,应力降低,从而促进煤层瓦斯抽采。本文以河南平宝煤业有限公司首山一矿12090工作面瓦斯治理为例,介绍顺层水力冲孔

技术,分析水力冲孔后冲孔区域煤体变形和卸压规律,讨论深埋藏高应力环境下实际工程中遇到的问题及处理方法,根据现场试验结果分析水力冲孔的瓦斯治理效果。

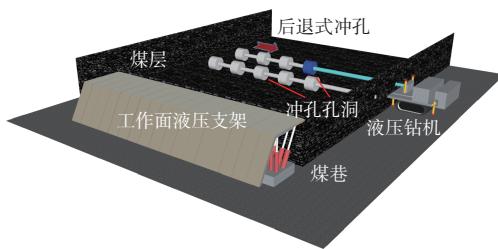


图1 工作面顺层水力冲孔施工

Fig. 1 Bedding hydraulic flushing construction in working face

1 工作面概况

首山一矿12090工作面走向长1 754 m,采煤工作面斜长236 m,平均煤厚5.3 m,可采储量为290万t。采煤工作面标高为-704.5~ -759.2 m,煤层埋深为845~974 m。煤层倾角为3~12°,平均为7°。煤层结构单一,厚度较稳定,煤体呈黑色粉末状,较为松软、破碎,具条带状结构,坚固性系数为0.12~0.35。基本顶为细粒砂岩,厚度为9.6~18.6 m,灰色,块状结构,以石英为主。基本底为石炭纪灰岩上段,厚度为17.8 m,深灰色,块状、隐晶质结构。煤层瓦斯压力超过0.7 MPa,瓦斯含量为6.7 m³/t以上,煤层透气性系数为0.076 m²·MPa⁻²·d⁻¹。煤层透气性低,煤质较软,受煤体赋存结构影响,瓦斯涌出异常,属于高应力低透气性松软突出煤层,瓦斯问题严重制约了安全生产。

为解决瓦斯问题,在12090工作面中间布置中煤巷并施工水力冲孔钻孔,以提高煤层瓦斯抽采效果。冲孔设计如图2所示。由中煤巷自切眼向外30 m至终采线位置范围内分别在上下帮垂直煤壁向

采煤工作面施工顺层钻孔, 钻孔平行于煤层顶板, 钻孔间距为 4 m, 孔深 90 m。顺层钻孔施工完毕后开始后退式冲孔, 每个钻孔间隔 7~8 m 进行一次冲孔, 形成冲孔孔洞。冲孔作业在后退至距巷帮 30 m 时停止, 以减小对巷帮的应力扰动, 避免应力集中影响。打钻采用 ZDY7300LXY 型矿用履带式液压钻机, 配套清水泵站和履带式煤水分离器。打钻设计采用直径 94 mm 钻杆, 实际钻孔施工位置控制在采煤工作面前方约 100 m 处, 以减小对采煤工作面的影响。

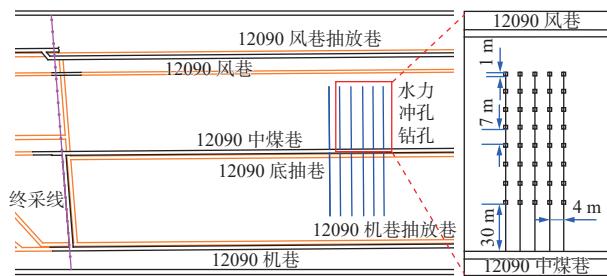


图 2 12090 工作面冲孔设计

Fig. 2 Hydraulic flushing design in 12090 working face

2 工作面顺层水力冲孔数值分析

2.1 数值模型建立

根据首山一矿 12090 工作面实际情况进行适当简化, 利用 FLAC^{3D} 建立如图 3 所示的数值模型。模型在工作面走向(X 方向)、倾向(Y 方向)、竖直方向(Z 方向)上的长度分别为 300, 210, 50 m, 煤巷宽 5 m, 煤层厚 5 m, 顶底板厚度分别为 25, 20 m。根据 12090 工作面应力分布, 模型顶面施加 22.5 MPa 的垂直应力, 底面固定约束; 模型 X 方向水平应力为 18 MPa, Y 方向水平应力为 27 MPa, 模型四周为滑动边界。根据水力冲孔设计方案, 模型中建立相应的冲孔区域。水力冲孔钻孔间距为 4 m, 共布置 12 组水力冲孔钻孔, 钻孔位于煤层高度的中心位置。煤体的力学性质通过实验测得, 顶底板岩性根据地质条件进行简化。模型物理力学参数见表 1。

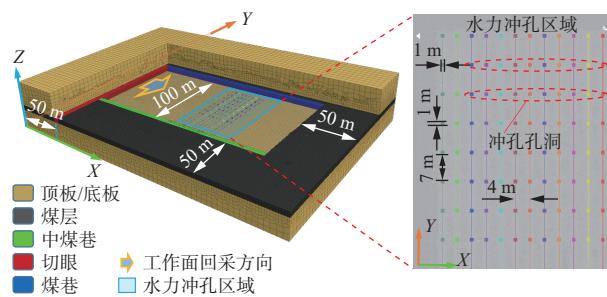


图 3 12090 工作面顺层水力冲孔数值模型

Fig. 3 Numerical model of bedding hydraulic flushing in 12090 working face

表 1 数值模型物理力学参数

Table 1 Mechanical mechanics parameters of numerical model

岩层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
顶板/底板	12	9	5	3	33	2 500
煤层	3.26	1.28	0.57	0.33	48	1 438

数值模拟过程分为 3 阶段。第一阶段为模型初始化: 建立好模型后赋值并计算至平衡状态, 观察模型建立及参数设置是否正确。第二阶段为巷道开挖: 依次开挖煤巷和切眼, 并将模型计算至平衡状态。第三阶段为水力冲孔: 将模型中预先定义的冲孔部分删除并计算至平衡状态。水力冲孔阶段简化为将冲孔区域的单元直接删除, 未考虑时间因素。

2.2 数值模拟结果分析

2.2.1 冲孔区域煤体变形

水力冲孔区域煤体在水平方向上的位移云图如图 4 所示。可看出冲孔后煤体均朝向冲孔孔洞变形, 且呈对称分布。孔洞 X 方向两侧煤体均朝向孔洞中心变形, 2 个相邻孔洞之间变形小, 说明 2 个孔洞之间存在一个小变形区。煤体在 Y 方向的变形与 X 方向相似, 如图 4(b)中虚线框所示, 孔洞两侧煤体 Y 方向位移相互连通, 形成煤体的整体变形, 有利于煤体裂隙扩展和贯通。由于 Y 方向应力较高, 所以孔洞周围煤体在 Y 方向的位移较大。由此可知, 应力高的方向上煤体变形范围和位移大, 且 Y 方向的变形盲区恰好为 X 方向的主要变形区, 因此除相邻孔洞的正中间位置外, 孔洞周围一定范围内的煤体均能发生有效变形。

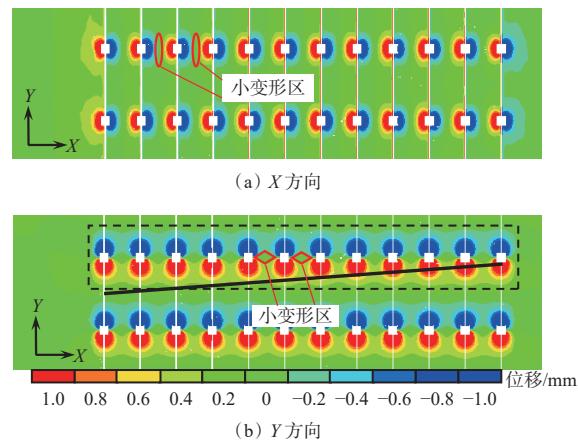


图 4 冲孔区域煤体水平方向位移云图

Fig. 4 Horizontal coal displacements nephogram in flushing area

为了分析整个冲孔区域的变形情况, 同时考虑冲孔孔洞周围煤体变形呈对称分布的情况, 位移提取线选择一条斜线。以 Y 方向上的变形为例, 位移提取线如图 4(b)中黑色实线所示。提取线的起点为

第1排钻孔2个孔洞的中心位置,终点为最后一排孔洞的边缘,因此提取线能反映Y方向3 m、X方向44 m范围的煤体变形情况。X方向位移用相同的提取方法,能反映X方向1.5 m、Y方向56 m范围内的煤体变形情况。

冲孔孔洞周围煤体X方向位移如图5(a)所示。提取线上的位移呈波动状,位移每经过一次降低后,峰值增大,但最后一个波峰不是最大值,原因是此处距离煤巷过近(13 m),煤体变形受到巷道开挖引起的应力集中影响。这说明冲孔不宜施工在距离巷帮较近的位置,否则容易扰动煤体,且不利于孔洞周围煤体变形,限制瓦斯抽采效果。波峰表示靠近冲孔孔洞位置的煤体位移,波谷表示普通钻孔两侧的煤体位移。波谷变化很小,说明普通钻孔段的煤体在X方向的变形有限,即使在提取线越来越临近钻孔的过程中,位移变化也不明显。从波峰变化可看出,冲孔孔洞周围的煤体变形非常明显,且随提取线长度增加呈非线性增大趋势。这说明冲孔孔洞周围煤体变形更加充分,能有效促进煤体的裂隙发育。冲孔孔洞周围煤体Y方向位移如图5(b)所示。可看出提取线上前15 m的位移近似呈线性缓慢增大,说明普通钻孔两侧煤体受冲孔影响较小。

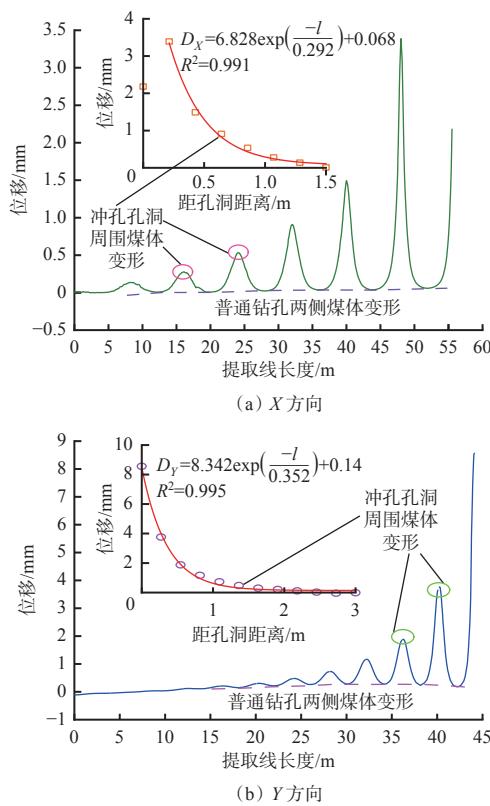


图5 煤体水平方向位移

Fig. 5 Horizontal coal displacements

图5给出了冲孔孔洞周围煤体X、Y方向位移 D_X 、 D_Y 与距孔洞距离 l 的拟合关系(R^2 为拟合度)。

可看出煤体在X、Y方向的位移均呈指数规律,且Y方向位移大于X方向。

2.2.2 冲孔区域煤体应力分布

冲孔区域煤体水平方向应力分布如图6所示。从图6(a)可看出,冲孔对X方向应力产生了明显影响,孔洞两侧应力降低,且应力降低区域相互连通,形成了冲孔区域X方向上的卸压条带。应力降低区域的煤体易变形,瓦斯易释放,因此卸压条带内的煤层瓦斯更容易抽采。在钻孔46, 54 m处,冲孔孔洞周围煤体卸压范围更大,形成的卸压条带范围也更大;30, 70 m处冲孔孔洞周围煤体卸压范围相似;78, 86 m处卸压范围最小,卸压区域没有相互连通形成卸压条带,原因是受到巷道开挖引起的应力转移影响。普通钻孔两侧的应力降低范围十分有限。钻孔周围X方向卸压区域分布形态与位移分布类似,以冲孔孔洞为中心呈放倒的“8”形,并互相连接。

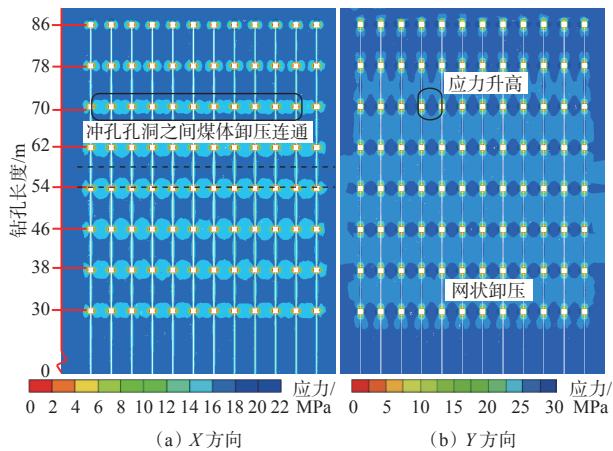


图6 煤体水平方向应力分布

Fig. 6 Horizontal coal stress distribution

Y方向上的煤体应力分布与X方向存在明显差异。受钻孔影响,冲孔孔洞周围Y方向上的煤体卸压区域呈“X”状,如图6(b)所示。较为明显的卸压区域分布在孔洞Y方向两侧,在2个相邻孔洞之间产生应力升高。与X方向上的卸压条带不同,Y方向应力卸压区域相互贯通,形成了更大范围的网状卸压区。即使是在普通钻孔段,两侧煤体在Y方向上的应力也有效降低。86 m处孔洞周围煤体Y方向上的卸压范围较小,原因是受到巷道开挖引起的应力集中影响。应力升高区域与图4(b)中小变形区相对应。

综合X、Y方向上的煤体变形和应力分布可看出,冲孔孔洞在Y方向上产生的小变形区和应力升高区恰好是X方向上的主要变形区和应力降低区,因此冲孔孔洞可起到释放煤层应力、促进煤体变形的作用,从而促进瓦斯运移与抽采。

2.2.3 钻孔间距对煤体卸压的影响

为了探究钻孔间距对卸压效果的影响,建立钻孔间距为 8 m 的数值模型。钻孔间距为 4, 8 m 时煤体变形对比如图 7 所示。可看出钻孔间距为 4 m 时, 相同冲孔条件下冲孔区域内煤体变形明显。冲孔孔洞覆盖范围内的变形区域相互连通, 形成煤层的整体变形。而钻孔间距增至 8 m 时, 因冲孔孔洞影响范围有限, 孔洞周围煤体变形没有连通, 孔洞之间还存在大范围的未受影响区。因此, 钻孔间距为 4 m 时冲孔后的煤体变形效果更好。

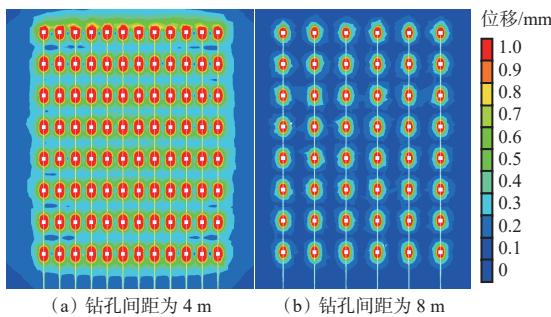


图 7 钻孔间距为 4, 8 m 时煤体变形对比

Fig. 7 Coal deformation comparison under the borehole spacing of 4 m and 8 m separately

钻孔间距为 8 m 时 X 方向的煤体应力分布如图 8 所示。与图 6(a)相比, 钻孔间距由 4 m 增大至 8 m 时, X 方向煤体应力降低区域只在冲孔孔洞附近, 各孔洞之间未形成连通的卸压条带, 说明钻孔间距为 8 m 时煤体卸压效果受限, 不利于煤层瓦斯抽采。

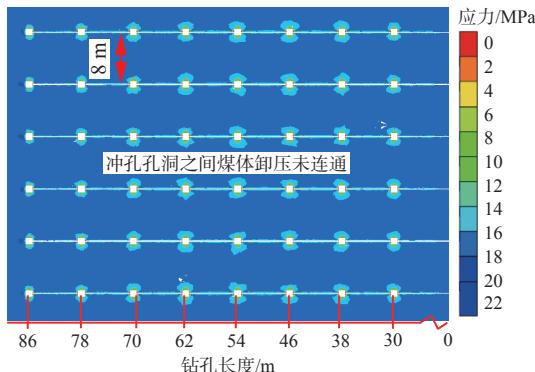


图 8 钻孔间距为 8 m 时煤体 X 方向应力分布

Fig. 8 Coal stress distribution at X direction under the borehole spacing of 8 m

3 顺层水力冲孔现场应用

数值模拟结果表明设计的水力冲孔方案可有效促进煤体变形和卸压, 利于煤层瓦斯抽采。实际冲孔钻孔施工以设计方案为基础, 以数值模拟结果为补充, 根据现场条件进行调整和优化。

3.1 施工参数优化

3.1.1 钻孔直径

根据煤层倾角, 中煤巷上帮和下帮的钻孔角度分别控制在 $5\sim6^\circ$ 和 $-5\sim-4^\circ$ 。前期作业采用直径 94 mm 钻杆, 进入煤帮 30~50 m 时易发生夹钻、顶钻、喷孔等现象, 影响施工进度。后改用直径 113 mm 钻杆。不同直径的钻杆在煤巷上帮施工的孔深对比如图 9 所示。可看出直径 113 mm 钻杆施工的孔深明显大于直径 94 mm 钻杆, 以钻孔角度 $5\sim6^\circ$ 施工时, 孔深基本能达到 70 m 以上。

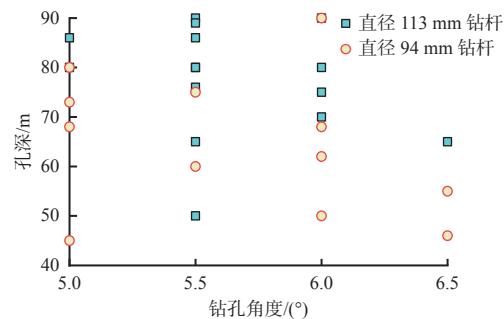


图 9 不同直径钻杆对应的上帮孔深

Fig. 9 Borehole depth of upper side under different drill pipe diameters

3.1.2 钻孔间距

为确定合适的钻孔间距, 需研究冲孔孔洞的等效半径和影响半径。冲孔等效半径一般通过冲孔出煤量估计。记录上下两帮连续 5 组钻孔的冲孔出煤量, 结果如图 10 所示, 其中 S-1—S-5 和 T-1—T-5 分别为上帮和下帮钻孔。可看出除钻孔 S-1 施工至 74 m, 钻孔 S-2, T-4 施工至 82 m 以外, 其余钻孔施工长度均达到 90 m。上帮钻孔 S-1, S-2, S-3 冲孔出煤量较低, 中间位置的孔洞冲孔出煤量较高。下帮钻孔 T-1 和 T-2 冲孔出煤量较低, 其他钻孔冲孔出煤量没有明显的分布特征。冲孔的单孔出煤量为 0.7~1.8 t, 冲出体积为 $3.76\sim11.3 \text{ m}^3$ 。

假设煤体冲孔后形成圆柱形孔, 通过体积换算可得冲孔等效半径为 $0.38\sim0.6 \text{ m}$ 。最大冲孔直径超过普通瓦斯抽采钻孔直径的 10 倍。按照平均出煤量 1.2 t 计算, 可得冲孔等效半径为 0.5 m 。根据计算结果, 冲孔间距应大于 1 m。

采用流量法测定冲孔影响半径。流量法是通过预先打好的抽放钻孔作为考察钻孔, 抽放一定时间后, 在预计考察钻孔影响范围内实施水力冲孔作为被考察钻孔。水力冲孔和抽放期间测定钻孔瓦斯浓度和流量, 瓦斯浓度和流量明显提高的距离为冲孔影响半径。经测定, 首山一矿的水力冲孔影响半径为 $4.2\sim5 \text{ m}$, 因此钻孔最大间距为 $8.4\sim10 \text{ m}$ 。试验

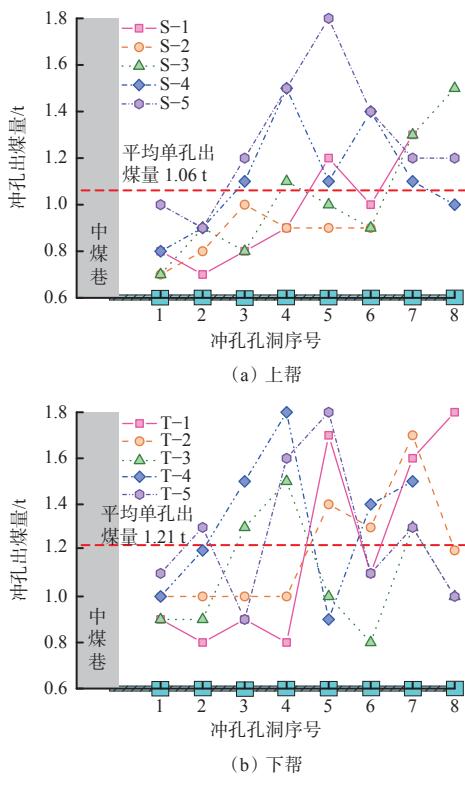


Fig. 10 Coal output of hydraulic flushing

发现,钻孔间距为1.6 m时发生了钻孔打穿现象,间距为7 m时2排冲孔钻孔中间位置的瓦斯抽采钻孔受影响较小,间距为3~6 m时瓦斯抽采效果良好。

通过不断调整发现,冲孔水压为5~6 MPa、流量为120~160 L/min时,冲孔出煤效果较好。随着工艺流程的不断完善,每月成孔数达40个,成孔率可达80%。

3.2 煤层冲孔瓦斯治理效果考察

3.2.1 钻孔瓦斯浓度

为了检验水力冲孔钻孔的瓦斯治理效果,对冲孔钻孔和普通钻孔的瓦斯浓度进行4个月连续监测。2个冲孔钻孔和1个普通钻孔的瓦斯浓度变化如图11所示。可看出冲孔钻孔和普通钻孔的瓦斯浓度衰减存在较大差异。在瓦斯抽采10 d内,瓦斯体积分数达90%以上,钻孔之间差异较小。随着抽采时间增加,普通钻孔内的瓦斯浓度衰减较快。抽采50 d左右时,普通钻孔内的瓦斯体积分数降至20%,水力冲孔钻孔内的瓦斯体积分数为40%~60%,是普通钻孔瓦斯体积分数的2~3倍。抽采120 d后,普通钻孔内的瓦斯体积分数降至10%左右,而冲孔钻孔内的瓦斯体积分数仍有20%。结果表明水力冲孔钻孔内的瓦斯抽采浓度高,衰减慢,有效提高了煤层瓦斯抽采效果,降低了煤层瓦斯含量。

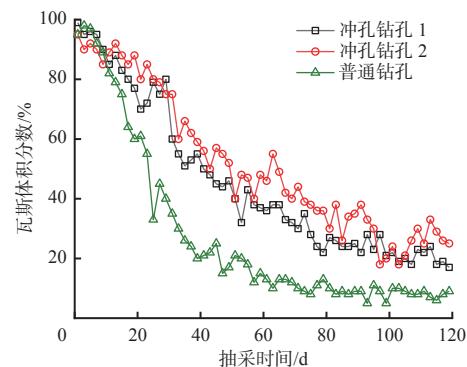


图11 钻孔瓦斯浓度变化

Fig. 11 Change of gas concentration in boreholes

3.2.2 回风流瓦斯浓度

水力冲孔冲出了大量煤与瓦斯,同时也强化了瓦斯抽采效果。为了考察冲孔钻孔瓦斯治理效果,记录连续8 d的风流瓦斯浓度变化,如图12所示。可看出冲孔作业后,风流瓦斯浓度明显降低,煤层瓦斯得到有效控制。1 d中的回风流平均瓦斯体积分数维持在0.4%~0.5%,风流瓦斯浓度降低,且更加稳定。

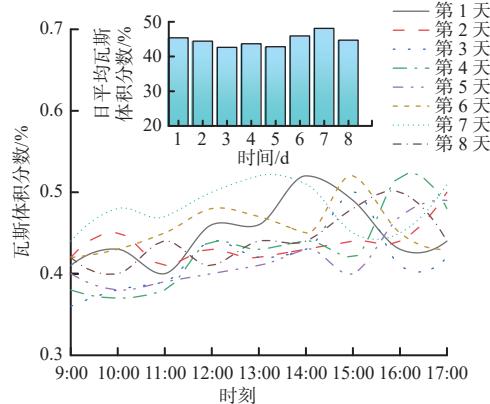


图12 冲孔后风流瓦斯浓度变化

Fig. 12 Change of gas concentration in air flow after hydraulic flushing

3.2.3 打钻动力现象变化

在工作面未回采至冲孔区域时,采煤工作面回风流瓦斯含量较高,且动力现象较严重。在补充局部瓦斯抽采钻孔时,钻杆钻进煤帮6~10 m易发生夹钻、顶钻、喷孔等现象,煤与瓦斯突出潜在危险性较大。受瓦斯影响,采煤工作面日平均进尺仅为2.4 m,生产进度缓慢。经过水力冲孔后,煤层渗透率有效提高,瓦斯抽采量增大。工作面打钻过程中的动力现象明显减少,局部瓦斯效检孔所测瓦斯参数均显著降低。采煤工作面平均日进尺由2.4 m增加至3.2 m,提高了生产率。

4 结论

(1) 水力冲孔能有效促进煤体变形,降低煤层内的水平应力。水力冲孔后,不同水平方向的煤体变

形相互补充,使得冲孔区域煤体朝向孔洞变形,促进了煤体裂隙发育,进而提高了煤体渗透率。同时,冲孔孔洞周围不同方向的水平应力在一定程度上得到释放,各孔洞的应力降低区域相互连通,冲孔区域内煤体水平应力整体降低,促进了瓦斯运移和抽采。

(2) 实际水力冲孔作业受众多因素影响,如打钻角度、钻杆直径、射流水压和流量、钻孔间距、冲孔间距等。合适的施工参数可有效降低打钻过程中的动力现象,同时提高施工速度和成孔率。根据数值模拟结果并经过不断试验与摸索,12090 工作面确定的上帮钻孔角度为 5~6°,下帮钻孔角度为-5~-4°,冲孔间距为 7 m,钻孔间距为 4 m,冲孔长度为 1 m,冲孔水压为 5~6 MPa,流量为 120~160 L/min。随着工艺流程不断完善,每月成孔数达 40 个,成孔率达 80%。

(3) 水力冲孔钻孔比普通钻孔瓦斯抽采浓度高,衰减慢,能有效提高煤层瓦斯抽采效果,降低煤层瓦斯含量;风流瓦斯浓度和钻孔施工过程中的动力现象变化也表明,水力冲孔有效提高了瓦斯抽采效果,降低了煤层瓦斯含量。冲孔后回风流瓦斯体积分数降低至 0.4%~0.5%。冲孔后,钻孔施工作业过程中的夹钻、顶钻、瓦斯喷孔等现象明显减少,瓦斯校检参数有效降低;采煤工作面平均日进尺由 2.4 m 增加至 3.2 m,提高了生产率。

参考文献(References):

- [1] 马文涛, 马小辉, 吕大钊, 等. 深部掘进巷道爆破卸压防治冲击地压技术[J]. 工矿自动化, 2022, 48(1): 119-124.
MA Wentao, MA Xiaohui, LYU Dazhao, et al. Blasting pressure relief technology for preventing rock burst in deep heading roadway[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(1): 119-124.
- [2] FAN Deyang, LIU Xuesheng, TAN Yunliang, et al. Roof cutting parameters design for gob-side entry in deep coal mine: a case study[J]. *Energies*, 2019, 12(10): 2032.
- [3] 崔建军. 深部沿空掘巷变形破坏机理及控制技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(7): 12-17.
CUI Jianjun. Study on deformation and failure mechanism and control technology of deeply gob-side entry driving[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(7): 12-17.
- [4] 杨天鸿, 徐涛, 刘建新, 等. 应力-损伤-渗流耦合模型及在深部煤层瓦斯卸压实践中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2900-2905.
YANG Tianhong, XU Tao, LIU Jianxin, et al. Coupling model of stress-damage-flow and its application to the investigation of instantaneous seepage mechanism for gas during unloading in coal seam with depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2900-2905.
- [5] 翟成, 徐吉钊. 液氮循环致裂技术强化煤层气抽采的研究与应用展望[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(10): 1-8.
ZHAI Cheng, XU Jizhao. Research on cyclic liquid nitrogen fracturing technology for enhancing coalbed methane drainage and its application prospect[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(10): 1-8.
- [6] 刘明举, 孔留安, 郝富昌, 等. 水力冲孔技术在严重突出煤层中的应用[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(4): 451-454.
LIU Mingju, KONG Liu'an, HAO Fuchang, et al. Application of hydraulic flushing technology in severe outburst coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(4): 451-454.
- [7] ZHANG Hao, CHENG Yuanping, YUAN Liang, et al. Hydraulic flushing in soft coal sublayer: gas extraction enhancement mechanism and field application[J]. *Energy Science and Technology*, 2019, 7: 1970-1993.
- [8] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 105-112.
PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 105-112.
- [9] 张嘉凡, 程树范, 高壮, 等. 煤岩液态二氧化碳爆破开采实践与模拟[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(增刊1): 24-27.
ZHANG Jiafan, CHENG Shufan, GAO Zhuang, et al. Practice and simulation of coal-rock mining by liquid carbon dioxide blasting[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(S1): 24-27.
- [10] XU Jizhao, ZHAI Cheng. Petrological and ultrasonic velocity changes of coals caused by thermal cycling of liquid carbon dioxide in coalbed methane recovery[J]. *Fuel*, 2019, 249: 15-26.
- [11] 姚俊辉, 陈辉, 管伟明, 等. 微波加热对煤层顶板砂岩微结构的影响[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(2): 80-85, 92.
YAO Junhui, CHEN Hui, GUAN Weiming, et al. Effect of microwave heating on microstructure of sandstone in coal seam roof[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(2): 80-85, 92.
- [12] 李雁, 李兵, 姚帅, 等. 基于 CT 扫描的受载破裂煤样注浆封堵效应量化研究[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(4): 53-59.
LI Yan, LI Bing, YAO Shuai, et al. Quantitative study on grouting plugging effect of loaded fractured coal sample based on CT scanning[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(4): 53-59.
- [13] 鲍先凯, 武晋文, 杨东伟, 等. 高压电脉冲水压致裂煤体效果试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(9): 133-138.
BAO Xiankai, WU Jinwen, YANG Dongwei, et al. Experimental study on coal fracturing effect by high-voltage pulsed water pressure[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(9): 133-138.

(下转第 141 页)