

坚硬顶板综放工作面末采切顶护巷 水压致裂控制技术

杨计先*

(潞安集团漳村煤矿, 山西 长治 046100)

摘要:坚硬顶板具有硬度大、整体性好、难垮落等特点,但同时也导致综放工作面末采期间诸多围岩控制与安全问
题.本文以潞安集团漳村煤矿 2505 综放工作面为工程背景,利用工作面末采切顶护巷水压致裂控制技术,人为控制顶板垮
落,改变保护煤柱覆岩结构,得到了最优保护煤柱宽度为 70 m,最佳切水力切顶顶板合理破断位置为停采线前方 5 m 处.现
场监测结果表明,切顶后 20 d 内采区准备巷道顶底板最大下沉量为 446 mm,两帮最大移近量为 350 mm,支架载荷平均降
低了 38.8%,达到了保护采区准备巷道、缩小保护煤柱、安全高效回采的目的,为同类型矿井提供借鉴和指导.

关键词:坚硬顶板;水压致裂;综放工作面末采;切顶护巷;保护煤柱

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)01-0030-10

On Hydraulic Fracturing Control Technology of Roof Protection Roadway at the End of Fully Mechanized Caving Face with Hard Roof

Yang Jixian

(Zhangcun Coal Mine of Lu'an Group, Changzhi 046100, China)

Abstract: Hard roof has the characteristics of high hardness, good integrity and difficulty to collapse, which
leads to many surrounding rock control and safety problems during the final mining period of fully mechanized
caving face. Based on the engineering background of 2505 fully mechanized top coal caving face in Zhangcun
Coal Mine of Lu'an Group, this paper uses the hydraulic fracturing control technology to control the roof collapse
artificially and change the overburden structure of protective pillars. The optimum width of protective pillars is
70 m, and the optimum location of reasonable breakage of hydraulic roof cutting is 5 m ahead of the stopping
line. The field monitoring results show that the maximum subsidence of roof and floor is 446 mm, the maximum
approach of two sides is 350 mm, and the support load is reduced by 38.8% on average within 20 days after roof
cutting. The purpose of protecting roadways, reducing protective pillars and safe and efficient mining is achieved,
which provides references and guidances for similar mines.

Keywords: hard roof; hydraulic fracturing; end mining of fully mechanized caving face; roof cutting and
roadway protection; coal pillar protection

停采线的合理位置一直是采煤行业面临的研究难题,停采线位置设计不合理,不仅对造成回撤通道以
及设备的搬迁困难,还导致附近准备巷道变形严重.当工作面停采位置处于周期来压期间时,老顶易发生
回转失稳,导致顶煤和直接顶破坏程度增加,支架后柱载荷明显增大,围岩-支架关系恶化,对收尾作业和

回撤支架最为不利,极易诱发顶板及其他次生事故^[1-3]。尤其顶板存在坚硬岩层时,工作面停采后,顶板难以垮落,形成长悬臂结构,支架承受载荷进一步加大,极有可能诱发压架事故^[4,5],此时为保证工作面安全回撤工作,往往选择增加保护煤柱尺寸,由煤柱来承担覆岩载荷,造成大量煤炭资源的浪费。若煤柱尺寸设计不合理,又往往造成巷道维护效果差,返修率高等一系列问题。

对于工作面末采阶段面临的问题,国内外学者进行了大量的研究工作。崔树江^[6]对同煤塔山矿进行现场煤体应力测试、巷道围岩松动圈测试得到了综放工作面超前应力明显影响范围小于50 m,在50~170 m范围内,支承压力逐渐降低,煤体完整性提高,煤体50~170 m范围内受超前压力影响较小;黄炳香^[5,7,8]使用人工切槽钻孔,利用高压注水实现了坚硬老顶的人为定向分层,提供了降低来压强度控制坚硬顶板的新途径。徐幼平,林柏泉^[9,10]等提出定向水力预裂技术,分析定向水力预裂过程中煤体的裂隙发展分布规律;梁大海^[11]运用断裂力学,分析了水力预裂定向分层的机理,得到了定向分层可降低老顶岩层每次垮落厚度或垮落步距,从而降低老顶来压强度。然而对于综放工作面末采阶段利用水力预裂进行断顶卸压的现场实践缺乏有效的尝试和研究。

山西潞安环保能源开发股份有限公司漳村煤矿主要开采煤层为3[#]煤层,煤质为优质瘦煤,矿井储量丰富,煤质优良。已回采结束的2503综放工作面末采大巷保护煤柱为80 m,但现场出现了采区准备巷道变形大,经常返修的问题,不仅造成大量煤炭资源的浪费,还增加了矿井的支护成本,影响了矿井的正常生产。正在回采的2505综放工作面设计预留90 m保护煤柱。根据煤矿安全高效节约化的开采理念,在保证安全开采的前提下,最大限度回收煤炭资源,针对2505综放工作面末采阶段利用水力预裂断顶卸压技术,优化煤柱尺寸,改善临近采区准备巷道应力环境,既保证了大巷稳定性,又提高了资源回收率。

1 工程背景

1.1 2505工作面概况

漳村煤矿2505工作面地面标高为+912.5~+955.3 m,工作面底板标高为+464~+520 m。工作面切眼长230 m,可采长度1 035 m。工作面采用“W”型通风,巷道从南至北依次为进风巷、回风巷、运巷。末采保护煤柱东部依次为皮带巷、材料巷、专用回风巷,2505工作面平面图如图1所示。开采煤层为3号煤,煤层平均厚度5.91 m,倾角2°~5°。直接顶为泥岩,平均厚度3.67 m。老顶为细粒砂岩,平均厚度9.22 m,其2505工作面顶底板综合柱状图如图2所示。

1.2 坚硬顶板末采存在的问题

1) 矿压显现剧烈。坚硬顶板分层厚度大、完整性好、抗断裂能力强,导致综放末采期间坚硬顶板形成悬顶,末采支架压力大,不利于支架回撤^[12]。

2) 临空巷道大变形。末采区域上方形成较长的以煤柱为支点的悬臂梁,煤柱承受较大覆岩载荷,在采动的过程中造成煤柱另一侧25皮带延伸巷等巷道失稳^[13]。

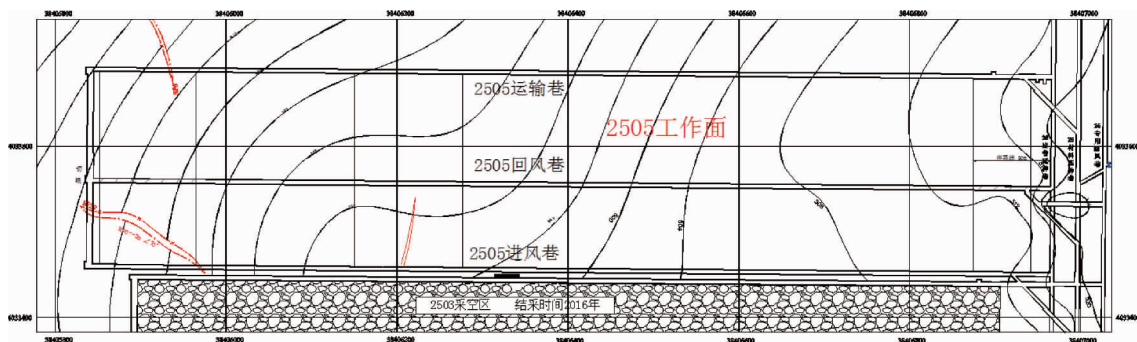


图1 2505工作面

层号	柱状 1:200	厚度	岩石名称	岩性描述
1		9.22	细粒砂岩	灰色, 厚层状, 细粒砂状结构, 夹含黑泥带。
2		3.67	泥岩	黑色, 块状, 泥质结构, 断口光滑, 含植物化石。
3		5.9	煤	黑色, 块状, 裂隙发育, 煤层结构:
4		0.7	泥岩	黑色, 块状, 泥质结构, 断口光滑, 含植物化石。
5		3.1	细粒砂岩	灰色, 厚层状, 细粒砂状结构, 夹含黑泥带。

图2 2505工作面顶底板综合柱状图

2 2505综放面末采停采线合理位置确定

根据漳村煤矿 2505 工作面地质条件建立 FLAC^{3D} 模型, 模型尺寸 270 m×200 m×50 m, 工作面长度为 230 m. 模型侧面为水平位移约束, 底面为垂直位移约束, 顶部为自由边界, 并施加等效于覆岩重力的均布载荷. 模拟分析不切顶和切顶条件下, 煤柱留设 50, 60, 70, 80 m 时, 25 皮带延伸巷以及 25 材料延伸巷的围岩变形情况, 模型如图 3 所示, 模拟结果如图 4 和图 5 所示.

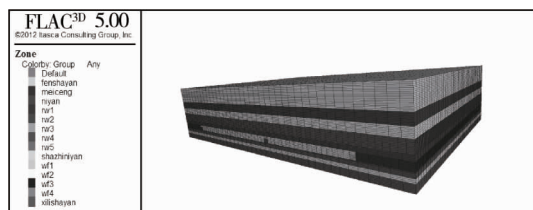


图3 数值计算模型

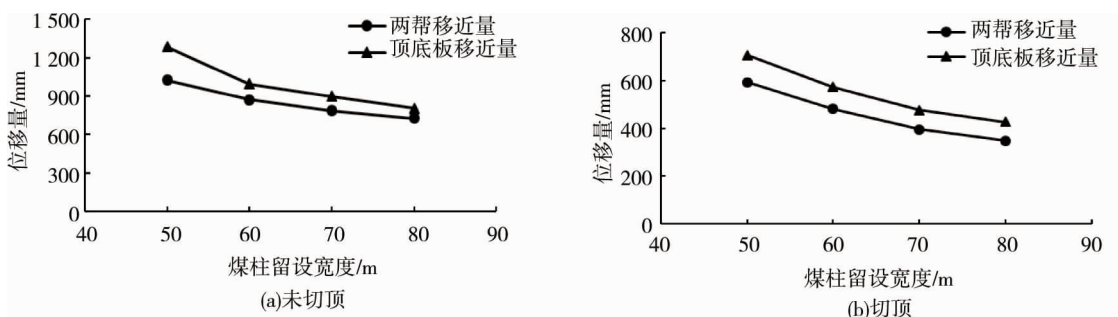


图4 25皮带延伸巷围岩变形曲线

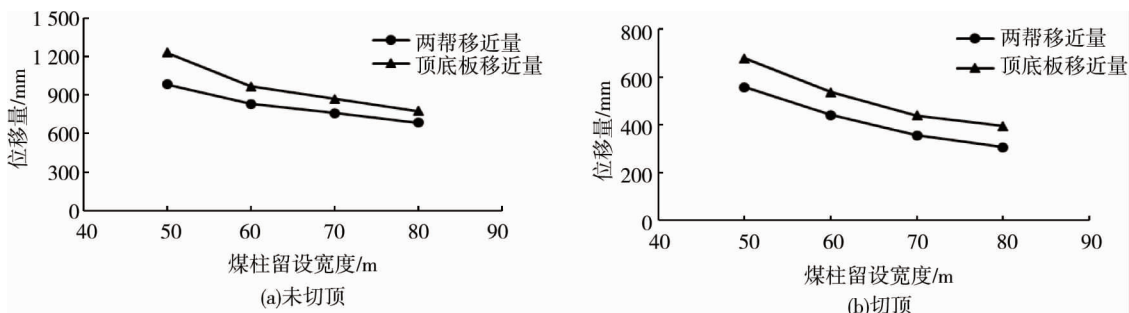


图5 25材料延伸巷围岩变形曲线

从图4和图5可以看出:随着煤柱宽度的增加巷道变形量呈现出逐渐减小的趋势,变形速率也逐渐变缓,因此存在一个最优煤柱宽度,末采阶段采用断顶卸压可以有效的控制巷道变形.70 m煤柱宽度条件下,切顶后25皮带延伸巷两帮移近量减少52%,顶底板移近量减少47%;25材料延伸巷两帮移近量减少55%,顶底板移近量减少49%.模拟结果表明:切顶情况下,当煤柱留70 m时,25皮带延伸巷两帮移近量为396 mm,顶底板移近量为477 mm;25材料延伸巷两帮移近量为357 mm,顶底板移近量为439 mm.当煤柱留设80 m时,25皮带延伸巷两帮移近量为348 mm,顶底板移近量为427 mm;25材料延伸巷两帮移近量为306 mm,顶底板移近量为395 mm.其中,25皮带延伸巷顶板沉降较为明显,25材料延伸巷底鼓较为明显.综合考虑确定煤柱留设宽度为70 m.

3 水压致裂技术参数分析

3.1 水力预裂技术原理

水压致裂切顶的原理把坚硬厚层顶板岩石分裂为一定尺寸和形状的块体或分层,由在钻孔围岩中产生的预裂缝而完成.预成裂缝的空间方位可以精确确定,也就确定了岩层中裂隙的发展方向.具体方法是在较短的时间内,采用高压水将岩体沿预先切割的初始裂缝破裂,导致岩体产生由预裂缝决定的层状面,在足够高的压力和足量的水压入的情况下所产生的分层面也称作拉裂面,半径可达10~25 m,甚至更大^[14-17],如图6所示.

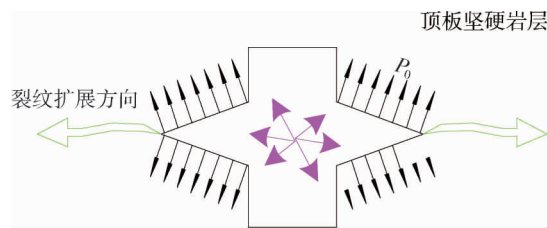


图6 定向水力致裂原理示意图

3.2 水力预裂合理位置分析

综放工作面末采阶段定向致裂的目的是在保证安全开采的前提下,最大程度将煤柱上覆岩层载荷转移至采空区,实现应力转移和卸压.顶板坚硬岩层对煤柱的挤压作用,煤柱采空侧会依次形成破碎区、塑性区和弹性区^[18,19],水压致裂前后定向预裂临空坚硬悬顶的合理断顶位置示意图如图7所示.

1) 断顶线位于煤柱破碎区上方

由于悬顶下没有煤柱支撑作为缓冲,会形成冲击荷载并可能诱导动力灾害,在采空区积累的气体甚至会突然被挤出来.由于悬挂式坚硬顶板的曲线与上覆岩层分离,定向水力预裂破断悬挑顶板的效果无法保证.

2) 断顶线位于煤柱塑性区上方

预裂位置适当向煤柱内部移动,释放的覆岩荷载增大,当破碎顶板下煤柱宽度达到临界值时,破碎悬顶会缓慢旋转,煤柱塑性区进一步减弱.整个破碎的悬挑顶滑入采空区,与矸石紧密接触,形成稳定的支撑结构.不仅减轻了顶板的荷载,而且消除了动力灾害.此位置通过水力预裂提高了悬顶的破断效果.

3) 断顶线位于煤柱弹性区上方

内部偏移距离不宜过长,否则破碎的顶板无法塌陷,与矸石接触.为了确保当煤柱发生压缩或剪切破坏时,顶板可以下降或滑挂在采空区,选取煤柱2种破坏模式下较小的内偏距作为最优内偏距差,可保证巷道围岩完整性和煤柱的有效宽度.

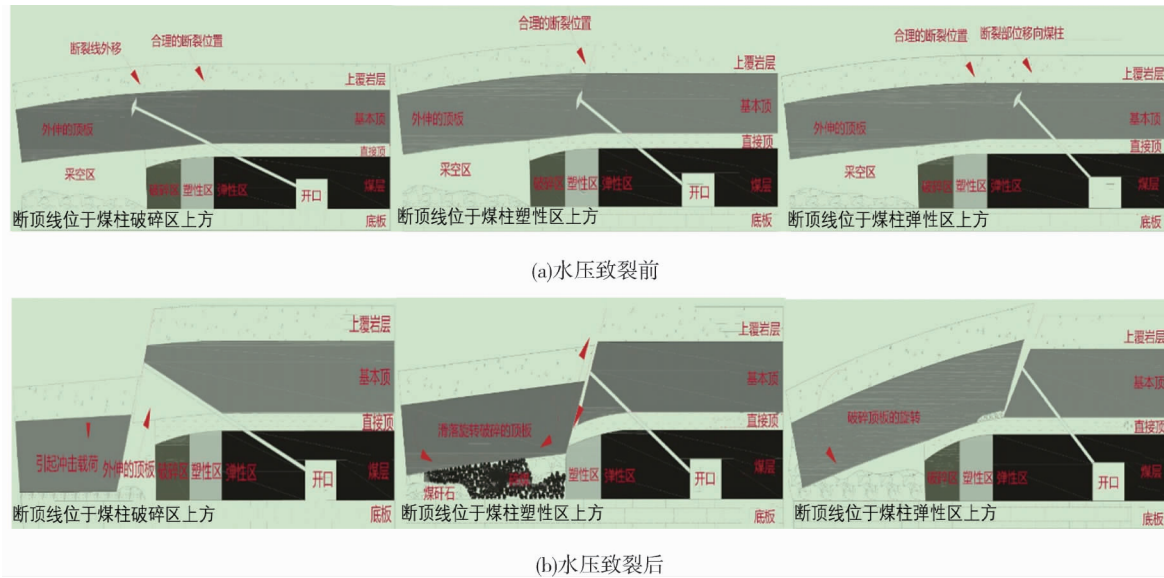


图 7 定向预裂临空坚硬悬顶的合理断顶位置

3.2 水力预裂合理位置理论计算

文献[20]计算临空悬顶定向水压致裂的合理断顶位置,其公式为

$$x_m = \min \left\{ \begin{aligned} x_{m1} &= \frac{\frac{1}{4} \frac{\lambda m}{\tan \psi_0} (M\gamma_c H + Y) \ln \left(\frac{\frac{M\gamma_c H + Y + c_0 \cot \psi_0}{\frac{D}{2} (q_n)_1 + (H+h)(l+a)\gamma}{a} + \gamma_0 h_0 + c_0 \cot \psi_0}{M\gamma_c H + Y - (H+h)\gamma - \gamma_0 H_0} \right) + \frac{D}{2} (q_n)_1 + (H+h)l\gamma}{M\gamma_c H + Y - (H+h)\gamma - \gamma_0 H_0} \\ x_{m2} &= \frac{\left[\frac{D}{2} (q_n)_1 + ly(H+h) \right] \sin \alpha}{2\tau_0 - [\gamma_0 h_0 + (H+h)\gamma] \sin \alpha} \end{aligned} \right.$$

式中: x_m 为煤柱采空侧发生压破坏或剪破坏时煤柱侧定向压力合理位置的最小值; x_{m1} 为煤柱采空侧发生压破坏时煤柱侧定向压裂的合理断顶位置; x_{m2} 为煤柱采空区侧发生剪切破坏时煤柱侧定向致裂的合理断顶位置;

λ 为煤层侧压系数; m 为煤柱的高度(m); ψ_0 为内摩擦角($^\circ$); $M = \frac{(2+b) + (2+3b)\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}$ (b 为统一强度理论参数,反映中间主应力 σ_2 对材料屈服或破坏的影响程度, $0 \leq b \leq 1$, 本文取 0.7); γ_c 为煤层的容重(MN/m^3); H 为坚硬悬顶的埋深(m); $Y = \frac{4(1+b)c\sin\varphi}{(2+b)(1-\sin\varphi)}$; c_0 为煤层界面的黏聚力(MPa); D 为采空区两侧悬顶之间的水平跨距(m); $(q_n)_1 = \frac{Eh^3(\gamma h + \gamma_1 h_1 + \dots + \gamma_n h_n)}{Eh^3 + E_1 h_1^3 + \dots + E_n h_n^3}$ (E 为老顶的弹性模量(GPa); $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 分别为紧挨老顶的上覆岩层容重(MN/m^3); h_1, h_2, \dots, h_n 是上覆的主要的顶板的厚度(m); E_1, E_2, \dots, E_n 分别为紧挨老顶的上覆岩层的弹性模量(GPa); a 为煤柱的宽度(m); l, h 分别为老顶的悬臂长度(m)和厚度(m); h_0, γ_0 分别为直接顶的厚度(m)和容重(MN/m^3); γ 为容重(MN/m^2); α 为煤柱的剪切滑移角。

结合漳村煤矿 2505 工作面煤层厚度为 5.91 m,工作面埋深为 440 m 左右,煤体内聚力为 0.85 MPa,内摩擦角为 37° ,应力集中系数取 2.5,上覆岩层平均容重为 17.6 kN/m 等工程地质条件,将 2505 工作面各项参数代入上式计算可得坚硬顶板的合理断裂位置为 $x = 5$ m 处。

结合漳村煤矿 2505 工作面煤层厚度为 5.91 m,工作面埋深为 440 m 左右,煤体内聚力为 0.85 MPa,内摩擦角为 37° ,应力集中系数取 2.5,上覆岩层平均容重为 17.6 kN/m 等工程地质条件,将 2505 工作面各项参数代入上式计算可得坚硬顶板的合理断裂位置为 $x = 5$ m 处。

结合漳村煤矿 2505 工作面煤层厚度为 5.91 m,工作面埋深为 440 m 左右,煤体内聚力为 0.85 MPa,内摩擦角为 37° ,应力集中系数取 2.5,上覆岩层平均容重为 17.6 kN/m 等工程地质条件,将 2505 工作面各项参数代入上式计算可得坚硬顶板的合理断裂位置为 $x = 5$ m 处。

3.3 水力预裂效果模拟分析

基于 2505 工作面地质和工程条件,建立数值计算模型,如图 8 所示,模型长 400 m,高 450 m,为了简化和提高计算效率,煤柱采用莫尔库仑本构模型,模型中没有考虑水力-机械耦合计算的水力预裂过程.为了考虑水力预裂的效果,在模型中引入多个水力裂隙,假设生成的水力裂隙是水平的,穿过煤层上的粉砂岩、细粒砂岩和砂岩.

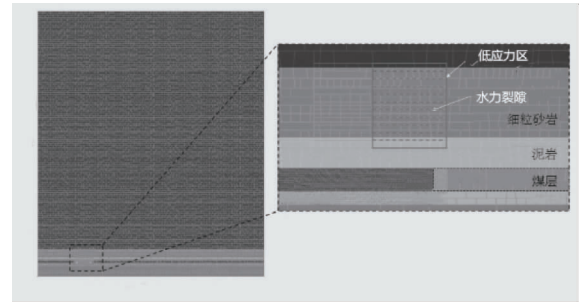


图 8 数值计算模型

图 9 和图 10 分别模拟了无水压致裂和有水压致裂作用下的应力分布情况.从图 9 和图 10 可以看出,水力裂隙对煤柱和顶板的内部应力的重新分布有显著影响.在没有水力预裂的情况下,煤柱内较大区域承受极高的采动应力.在进行水压致裂后,该区域内应力显著降低.在顶板内,水力裂隙的产生切断了采动应力的传递路径.由于水力裂隙的扩展,该区域的最大主应力显著降低.截断效应是通过岩体在产生的水力裂隙上滑动实现的,图中绘制了顶板岩层的开裂模式,可以看出在顶板中进行水力致裂后,水力裂隙是顶板岩层更多的发生剪切开裂,导致岩层之间更易产生滑动,从而实现良好的切顶效果.

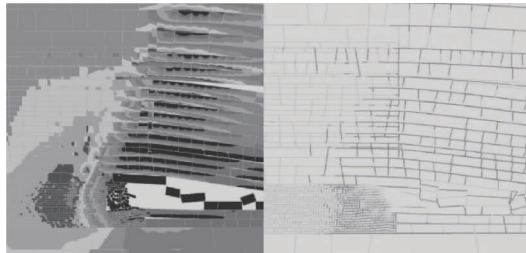


图 9 无水压致裂作用下应力重分布

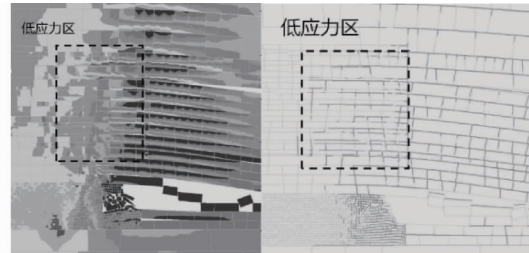


图 10 水压致裂作用下应力重分布

图 11 为水力压裂对煤柱内支承压力的影响曲线,表明不考虑水力预裂时,随着停采线的距离增大,垂直应力明显增大,在距离 7 m 左右达到峰值,然后逐渐减小.顶板采用水力预裂时,随着距停采线距离的增加,垂直应力也大幅度增加.然而,支承应力没有明显的峰值.在水力预裂过程中,整个煤柱内的支承应力明显减小.数值模拟结果表明,顶板内水力预裂可以降低煤柱内的支承应力,消除了应力峰值.

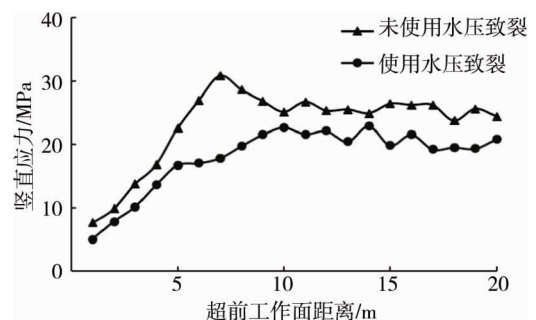


图 11 水力压裂对煤柱内支承压力的影响曲线

4 现场工业试验

4.1 水力预裂切顶方案设计及钻孔布置参数

在工作面停采线附近 2505 运输巷由西往东、2505 回风巷由东往西和由西向东、2505 进风巷由东往西分别布置 2 个预裂钻孔,1 个观察孔,其详细参数如图 12 所示.

在工作面停采线 2505 运输巷由西往东、2505 回风巷由东向西和由西往东、2505 进风巷由东往西,钻孔开口位置均在巷道帮部距离巷道底板 2 m 处分别开掘 2 个预裂钻孔.3 个钻孔均穿过直接顶岩层和基本顶岩层,底部位于上覆岩层.短预裂孔倾角为 25°,长预裂孔倾角为 15°,每个钻孔布置 8 个预制切槽,每个预制切槽之间水平间隔 3.5 m,具体布置方式如图 13~图 16 预裂钻孔布置剖面图.预裂钻孔参数见表 1 和表 2.

4.2 水压致裂设备选型及劳动组织

水力预裂设备选用BYW78/400型液压泵, $\Phi 56$ mm的开槽钻头, DZ-1型开槽刀具, DZ-2型开槽刀片, ZYL600型钻机. 封孔器外径43~45 mm(公差为2 mm), 膨胀直径可达56 mm 工作压力不低于30 MPa. 选用ET1.0型储能器, 2ZBQ24/10型手动泵. 利用CXK6全景钻孔窥视仪.

针对提供的水力切顶预裂参数与方案设计, 在回采巷道现场进行施工. 提供施工人员配备. 进行水力预裂的班组共计5人, 负责整体工作协调、高压泵的操作、水量的控制以及预裂钻孔与观察钻孔的观察, 详见表3所示.

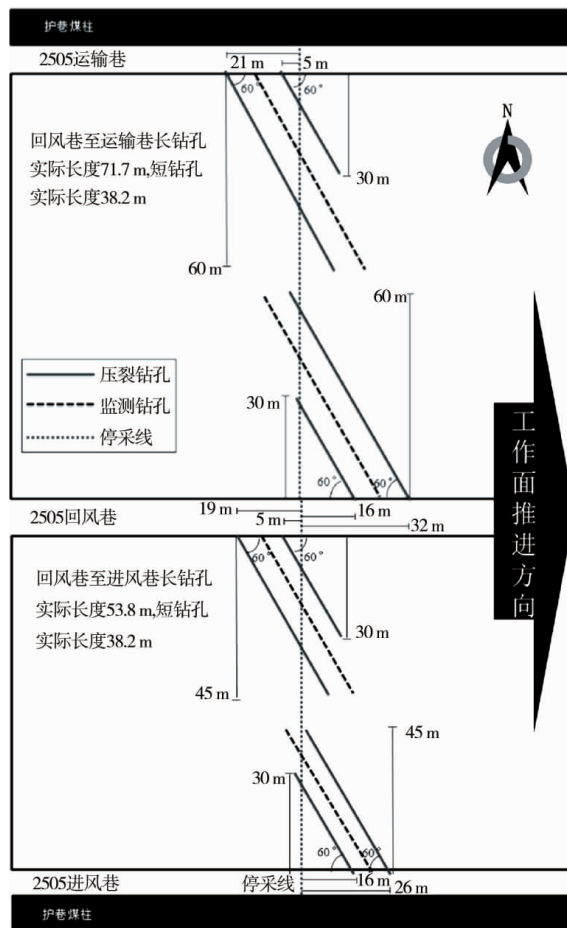


图12 预裂钻孔平面布置

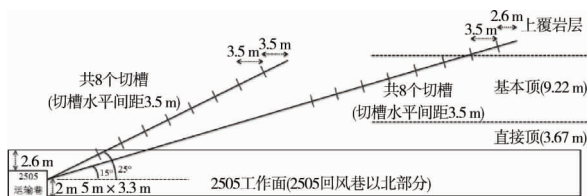


图13 2505 运输巷预裂钻孔布置

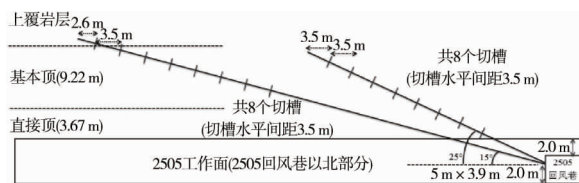


图14 2505 回风巷预裂钻孔布置(靠近运输巷一侧)

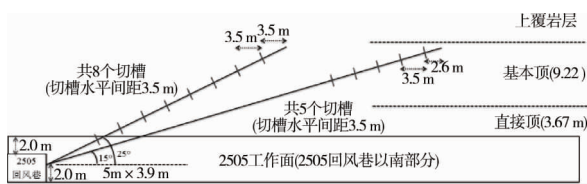


图15 2505 回风巷预裂钻孔布置(靠近进风巷一侧)

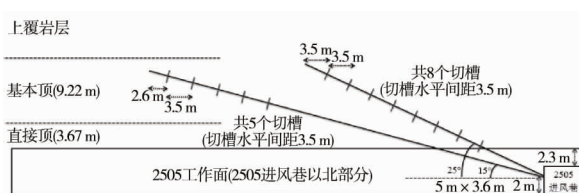


图16 2505 进风巷预裂钻孔布置

表 1 致裂方案预裂钻孔布置参数

位置	钻孔朝向(与回采方向)	钻孔直径/mm	钻孔与水平面垂直倾角/(°)	钻孔水平投影与巷道轴线夹角/(°)	钻孔端部与停采线距离/m	钻孔端部与巷道底板距离/m	钻孔长度/m	钻孔数量/个	单个钻孔切槽数量/个	初次切槽在钻孔内长度/m	切槽在钻孔内间距/m	
2505 运输巷	长预裂孔	一致	56	15	60	21	2	71.7	1	8	39.3	4.2
	短预裂孔	一致	56	25	60	5	2	38.2	1	8	2.5	4.5
2505 回风巷	长预裂孔	相反	56	15	60	32	2	71.7	1	8	39.3	4.2
	短预裂孔	相反	56	25	60	16	2	38.2	1	8	2.5	4.5
	长预裂孔	一致	56	15	60	19	2	53.8	1	5	39.3	4.2
	短预裂孔	一致	56	25	60	5	2	38.2	1	8	2.5	4.5
2505 进风巷	长预裂孔	相反	56	15	60	16	2	53.8	1	5	39.3	4.2
	短预裂孔	相反	56	25	60	26	2	38.2	1	8	2.5	4.5

表 2 致裂方案观察钻孔布置参数

位置	钻孔朝向(与回采方向)	钻孔直径/mm	钻孔与水平面倾角/(°)	钻孔水平面投影与巷道轴线夹角/(°)	钻孔端部与停采线距离/m	钻孔长度/m	钻孔数量/个
2505 运输巷	一致	56	20	60	16	71.7	1
2505 回风巷	相反	56	20	60	16	71.7	1
	一致	56	20	60	16	53.8	1
2505 进风巷	相反	56	20	60	16	38.2	1

表 3 预裂作业安排

序号	工作	时间/min	主要工作内容
1	准备	30	交接班
2	设备维护、试运营	30	高压泵、手动泵的运行、保养,注水胶管、注水管的通畅等
3	预裂	390	开启设备,切槽、封孔、注水、预裂
4	整理装备	30	使用的材料分门归类

4.3 效果监测

1) 巷道表面位移监测

当工作面距离停采线 15~20 m 时,开始在 25 皮带延伸巷和 25 材料延伸巷采用“十字交叉法”布置巷道表面位移监测站点,监测站点间隔均为 50 m,每条巷道布置 3 个点进行监测,监测时间为 60 d,监测结果如图 17 和图 18 所示。

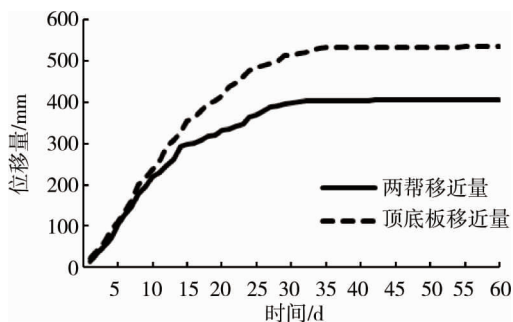


图 17 25 皮带延伸巷巷道围岩变形曲线

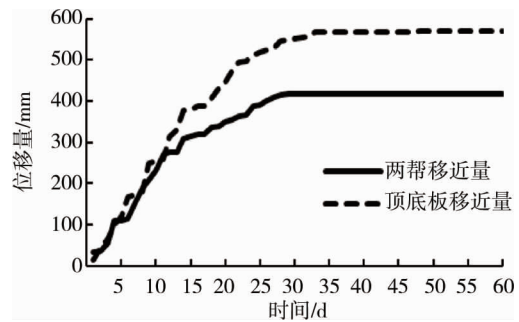


图 18 25 材料延伸巷巷道围岩变形曲线

25 皮带延伸巷测点布置 10 d 后,巷道顶底板移近量为 238 mm,两帮移近量为 220 mm,变形速率分别为 23.8 mm/d 和 22 mm/d,巷道初期变形速率较大,顶底板变形速率高于两帮;20 d 后,巷道顶底板下沉量为 417 mm,两帮移近量为 332 mm,变形速率分别为 20.85 mm/d 和 16.6 mm/d;巷道 20 d 内变形速率相比于 10 d 内的变形速率呈下降趋势,超过 35 d 后,巷道围岩变形逐渐趋于平缓。

25 材料延伸巷测点布置 10 d 后,巷道顶底板移近量为 254 mm,两帮移近量为 231 mm,变形速率分别为 25.4 mm/d 和 23.1 mm/d,巷道初期变形速率较大,顶底板变形速率高于两帮;20 d 后,巷道顶底板下沉量为 446 mm,两帮移近量为 350 mm,变形速率分别为 22.3 mm/d 和 17.5 mm/d;巷道 20 d 内的变形速率相比于 10 d 内的变形速率呈下降趋势,超过 35 d 后,巷道围岩变形逐渐趋于平缓。

2) 液压支架阻力监测.

在 2505 运巷机头端头液压支架布置 2 或 3 个顶板压力动态监测系统,监测 2505 工作面液压支架工作阻力,重点观测工作面推进至停采线附近(9 月、10 月、11 月)液压支架工作阻力情况,以分析预裂后工作面顶板破损情况.测量频度:每天观测.图 19 为支架工作阻力监测图,图中圈代表切顶后的突变点.

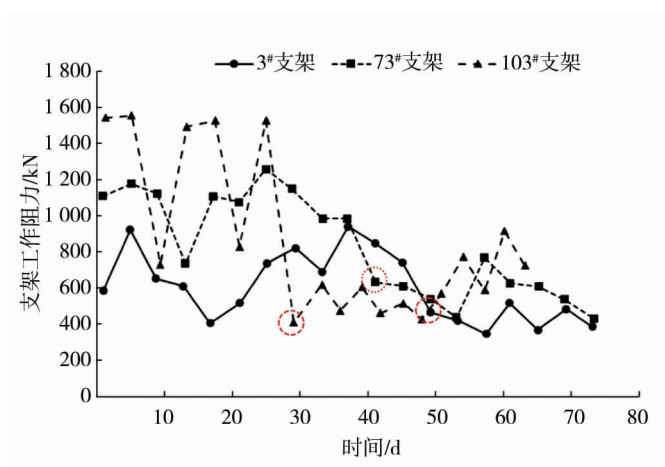


图 19 支架工作阻力监测图

3[#] 支架前 45 d 工作面支架阻力峰值为 926 kN,切顶处理后峰值降低为 514.9 kN,降低了 44.3%; 73[#] 支架前 40 d 工作面支架阻力峰值为 1 200.6 kN,切顶处理后峰值降低为 774.4 kN,降低了 30.89%; 108[#] 支架前 30 d 阻力峰值为 1 553.6 kN,切顶处理后,峰值降低为 913.5 kN,降低了 41.2%.从峰值变化的程度可以看出,2505 综放工作面采用水力切顶处理后,有效的破碎了顶板,降低了工作面支架工作阻力。

5 结论

1) 漳村矿 2505 综放工作面的水力切顶顶板合理破断位置为停采线前方 5 m 处.顶板中进行水力致裂后,顶板岩层更多的发生剪切开裂,导致岩层之间更易产生滑动,从而实现良好的切顶效果.

2) 漳村矿 2505 综放工作面留设 70m 宽度停采线煤柱最佳.

3) 现场监测结果表明,切顶后液压支架载荷平均降低了 38.8%,多采出 20 m 煤炭(约 41 400 t).工作面停采后,25 采区准备巷道 30 d 左右巷道变形基本达到稳定,两帮最大移近量 450 mm,顶底板最大移近量 570 mm.

4) 2505 坚硬顶板综放工作面末采水力压裂切顶护巷有效地控制了 25 采区准备巷道围岩的有害变形,减少了煤炭资源的损失,具有显著的经济效益与社会效益.

参考文献:

[1] 刘长友,曹胜根,钱鸣高,等.综放末采期间的矿压特征[J].煤炭科学技术,1998(5):46-49.

- [2] 周辉,渠成堃,黄健利,等.基于模型试验的深部煤层合理停采线结构分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(10):2373-2382.
- [3] 孙建,侯化强,王连国.综采工作面停采线合理位置确定[J].煤矿安全,2013,44(3):44-46.
- [4] 靳钟铭,徐林生.煤矿坚硬顶板控制[M].北京:煤炭工业出版社,1994:30-35.
- [5] 黄炳香,赵兴龙,陈树亮,等.坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2954-2970.
- [6] 崔树江.塔山矿综放工作面停采线合理煤柱宽度实测[J].煤矿安全,2015,46(3):190-193.
- [7] 黄炳香,程庆迎,刘长友,等.煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2):167-173.
- [8] 徐幼平,林柏泉,翟成,等.定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J].中国安全科学学报,2011,21(7):104-110.
- [9] 徐幼平,林柏泉,朱传杰,等.钻割一体化水力割煤磨料动态特征及参数优化[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4):623-627.
- [10] 韩龙.综采工作面末采及回撤矿压显现规律与顶板控制技术[J].煤矿安全,2017,48(s1):24-28.
- [11] 梁大海.坚硬顶板注水软化机理研究[D].太原:太原理工大学,2006.
- [12] 王华.煤矿综采和综放矿压显现对比分析[J].煤炭与化工,2016,39(9):4-6.
- [13] Huang B X, Wang Y Z. Roof weakening of hydraulic fracturing for control of hanging roof in the face end of high gassy coal long wall mining: a case study[J]. Archives of Mining Sciences, 2016, 61(3):601-615.
- [14] 龙威成,赵乐凯,陈冬冬,等.顺煤层定向长钻孔水力压裂煤层增透技术及试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(3):10-15.
- [15] 贾文超,张明杰,梁锡明,等.地应力与孔隙压力对定向水力压裂效果影响研究[J].煤炭科学技术,2018,46(12):151-157.
- [16] 张振配.坚硬难垮顶板水力压裂初次放顶技术研究[J].煤炭科学技术,2018(s2):86-89.
- [17] 王跃权.大埋深矿井工作面双回撤通道水力压裂卸压技术[J].煤炭科学技术,2018(s2):90-93.
- [18] 高飞.工作面坚硬顶板注水软化及水压致裂作用分析[J].煤炭与化工,2018,41(6):40-42.
- [19] 王镇.燕子山矿水压致裂强制放顶技术应用[J].煤炭与化工,2016,39(10):51-52.
- [20] 黄炳香,刘江伟,张权.临空巷道定向压裂坚硬悬顶的断顶线位置[EB/OL].北京:中国科技论文在线[2016-12-07].
<http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201612-147>.