



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

超高压水射流“横切纵断”防治复合煤岩动力灾害技术

易恩兵^{1,2,3}, 张永将^{2,3}

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037; 3. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:针对高地应力、低透气性煤与瓦斯突出及具有冲击地压危险性煤层复合煤岩动力灾害防治的难题,研究了超高压水射流横向切割煤层、纵向切割预裂顶板防治复合煤岩动力灾害技术。理论分析了超高压水射流切割煤岩体机制,超高压水射流切割冲击煤岩体促使其内部产生剪切应力和拉伸应力,加速煤岩体内部裂纹产生与扩展,促使煤岩体沿轴向和径向发生破坏。揭示了超高压水射流防治复合煤岩瓦斯动力灾害原理,超高压水射流横切是指切割煤体卸压增透,纵断是指切割顶板卸荷消能。通过相似材料配比切割实验得到切缝压力 100 MPa,喷嘴直径 2.5 mm,钻杆旋转速度 60 r/min,单刀割缝时间为 10 min 条件下,切缝深度最大可达 152 cm。数值分析表明钻孔内割缝间距为 2 m 和割缝钻孔间距为 8 m 时,卸压增透效果较好。综合分析确定超高压水射流横切煤层纵断顶板合理工艺技术参数,并应用于中煤新集二矿 220108 工作面灾害防治实践:切割煤体后单孔平均抽采纯量较未割缝钻孔提高 3.5 倍,煤层透气性系数较未割缝区域提高 30 倍,瓦斯抽采达标时间缩短 38%,煤体支撑压力降低 35%;切割顶板后工作面支架阻力分布在 20~25 MPa,厚层坚硬顶板均匀垮落,未出现高能量远场动载荷冲击采场现象,表明超高压水射流切割煤岩体显著降低远、近场应力载荷,减弱煤岩瓦斯复合动力灾害的发生。

关键词:超高压水射流;复合煤岩动力灾害;切缝;抽采纯量;应力监测

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2021)04-1271-09

Composite hazards prevention with breaking coal seam and roof by super high pressure water jet

YI Enbing^{1,2,3}, ZHANG Yongjiang^{2,3}

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China; 3. China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: Coal seam with high ground stress and low permeability is high likely to outburst especially as it has high rockburst possibility. In order to prevent this problem, this paper studied the technique of ultra-high pressure water jet. The ultra-high pressure water jet could cut the coal seam transversely and longitudinally. The transverse cut refers to the stress relief of coal body, and the longitudinal cut refers to the stress relief of rock. The failure mechanism of coal

收稿日期:2020-02-25 修回日期:2020-06-26 责任编辑:常明然 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.DY20.0290
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804208,2017YFC0804209);天地科技股份有限公司科技创新创业
资金专项资助项目(2018-TD-MS076)

作者简介:易恩兵(1984—),男,河南驻马店人,副研究员,博士研究生。E-mail:yienbing95@163.com

通讯作者:张永将(1981—),男,安徽宿州人,研究员,博士。Tel:023-65239284, E-mail:zhangyj_1026@163.com

引用格式:易恩兵,张永将.超高压水射流“横切纵断”防治复合煤岩动力灾害技术[J].煤炭学报,2021,46(4):1271-1279.

YI Enbing, ZHANG Yongjiang. Composite hazards prevention with breaking coal seam and roof by super high pressure water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1271-1279.



移动阅读

and rock under ultra-high pressure water jet cutting is analyzed theoretically. With the ultra-high pressure water jet cutting, shear stress and tensile stress occur in coal and rock mass, which accelerates the generation and expansion of cracks in coal and rock mass. Then, coal and rock would break along the axial and radial direction of water jet cutting. Similar simulation experimental data show that the cutting depth is 152 cm with 100 MPa water pressure, 2.5 mm nozzle diameter, 60 r/min rotary speed of drill pipe, 10 min water jet. Numerical experimental data show that the pressure relief is better with 2 m of two water jet point in a hole, and 8 m of two water jet holes. The ultra-high pressure water jet technique was applied in the 220108 working face in Xinji No. 2 Coal Mine. The extraction of gas in single hole with ultra-high pressure water jet cutting increases 3.5 times of single hole without ultra-high pressure water jet cutting, what is more, the permeability coefficient of coal seam increases 30 times, the time of gas extraction is shortened by 38%, the pressure of coal seam is reduced by 35%, the pressure of shield is distributed from 20 to 25 MPa. No high energy seism occurs during the breakage of rock strata. Those demonstrate that the ultra-high pressure water jet significantly reduces the rock and gas composite dynamic disaster.

Key words: ultra-high pressure water jet; composite coal rock dynamic disaster; slit; drainage scalar; stress monitoring

随着我国煤矿深井高地应力、高瓦斯压力煤炭高强度开采,不可避免的伴随冲击地压、煤与瓦斯突出复合煤岩动力灾害发生^[1-5]。目前已有的高压水射流切割松软煤体技术主要是针对煤与瓦斯突出、冲击地压单一动力灾害防治方面的研究^[6-10],同时低压水射流切割高硬度冲击地压煤层,切割缝槽宽度及半径较小,切割效果差。因此需要研究防治复合煤岩动力灾害超高压水射流成套工艺技术,即 100 MPa 超高压水射流切割煤体和顶板,减弱远、近场载荷应力及瓦斯压力,减弱冲击地压、煤与瓦斯突出复合灾害的发生。

针对复合煤岩瓦斯动力灾害发生机理,以往学者已开展大量研究工作,如窦林名等^[2,11]提出了动静载叠加诱发高静载、强动载和低临界应力 3 种类型动力灾害原理,构建适用于煤岩瓦斯复合型灾害的监测预警指标体系。高压水射流防治瓦斯突出灾害的研究如卢义玉等^[12]利用自激振荡脉冲水射流在煤层中割缝,增加煤层透气性,提高瓦斯解吸率,缩短石门揭煤时间;张建国等^[13]开发了将钻机钻进与射流割缝技术有机结合的穿层钻孔高压旋转水射流割缝增透防突技术,水射流压力低于 50 MPa,数值模拟研究了钻孔和射流缝槽卸压效果。另有学者^[14-18]利用高压水射流钻孔切缝研究了提高松软煤层瓦斯抽采率方面的技术难题,水射流增透技术是改造煤体结构的有效途径。

然而,目前针对复合动力灾害的机理及监测预警技术研究较多,而缺乏有效成套的防治技术体系;国内普通高压水射流防治煤与瓦斯突出单一动力灾害虽然有一定效果,但存在水射流切割煤体压力低、切割速度慢,加砂水射流操作复杂、易堵孔等问题;目前国内外 40 MPa 水射流切割预裂顶板是预先借

助机械刀具切割顶板形成缝槽,再退钻封孔压裂顶板,因操作工艺复杂,刀具易损坏,压裂厚层坚硬顶板成功率低等原因缺乏推广应用。因此,需要研发超高压(100 MPa)水射流切割煤岩体成套技术,直接切割煤岩体一体化防治复合煤岩瓦斯动力灾害。笔者采用理论分析、数值分析、实验等综合研究手段,研发 100 MPa 超高压水射流切割煤岩体工艺技术,该技术操作简单,切割速度快,切割缝槽深,并应用到新集二矿 220108 工作面复合煤岩动力灾害防治实践。

1 超高压水射流切割煤岩体机制

针对 100 MPa 超高压水射流切割煤岩体过程中,射流对接触点表面在极短时间内产生冲击作用(图 1),对接触区域煤岩介质进行切削扰动,随着射流的冲击,使煤岩体内部产生剪切应力和拉伸应力^[19],同时冲击作用会在接触面产生压缩-拉伸作用,加速煤岩体内部裂纹产生与扩展,促使煤岩体沿轴向和径向发生破坏。

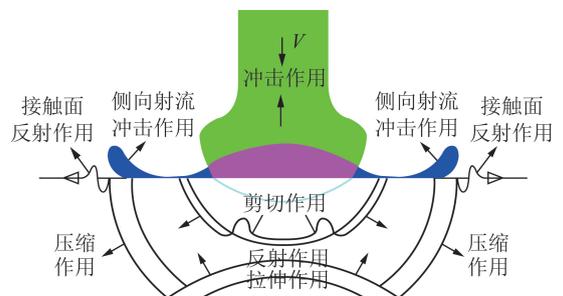


图 1 超高压水射流切割煤岩体机制示意

Fig. 1 Sketch of ultra-high pressure water jet cutting coal and rock mass

在超高压水射流冲击作用下,煤岩体发生损伤预裂破坏,微裂纹在水射流冲击力作用下发生二次扩

展,并最终形成宏观破坏。此时煤岩介质体处于单向拉应力状态, $\sigma_1 = \sigma_3 = 0, \sigma_2 = \sigma > 0$ (受拉)。微裂纹扩展所需达到的临界应力^[20]为

$$\sigma = \sigma_c = \sqrt{\frac{\pi}{4a_0}} K_{IC} \quad (1)$$

其中, σ_1 为煤岩介质所受最大主应力; σ_2 为煤岩介质所受中间主应力; σ_3 为煤岩介质所受最小主应力; σ 为煤岩介质所受主应力; σ_c 为微裂纹扩展临界应力; a_0 为初始微裂纹半径; K_{IC} 为煤岩体断裂因子的临界值。在临界应力作用下微裂纹的扩展长度为

$$l = c \left[1 - \cos\left(\frac{\pi\sigma_w}{2\sigma_u}\right) \right] \quad (2)$$

式中, c 为微裂纹扩展总长度, $c = a_u + l$, a_u 为微裂纹平均半径; σ_w 为微裂纹扩展临界应力; σ_u 为初始损伤区域内煤岩抗拉强度。将 $c = a_u + l$ 代入式(2)得

$$l = \frac{\eta}{1 - \eta} a_u \quad (3)$$

$$c = \frac{1}{1 - \eta} a_u \quad (4)$$

其中, $\eta = 1 - \cos\left(\frac{\pi\sigma_w}{2\sigma_u}\right)$ 。

由以上分析可知,在超高压水射流破煤岩过程中,主要是由冲击动载产生的剪切、拉伸应力综合作用导致煤岩体发生破坏。随着射流对煤岩体切割速度的剧烈变化,冲击载荷分布复杂^[20],最初极短时间内的切割效应使煤岩体处于压缩状态,随切割压力的急剧下降,高度压缩状态煤岩迅速卸压形成拉伸载荷,当卸载产生的拉伸应力超过煤岩自身强度极限时破裂。当射流冲击载荷不断增大,高压水顺着冲击裂纹传播并在裂纹尖端产生应力集中,削弱煤岩整体强度,卸压增渗,最终同自由面贯通使煤岩碎块从煤岩体表面整体脱离。

2 超高压水射流防治复合煤岩动力灾害原理

复合动力灾害发生的原理是在复合载荷共同作用下煤岩体的组合应力超过其极限承载强度从而发生急剧破坏^[2]。

如图2所示,复合煤岩瓦斯动力灾害发生的主要影响因素为煤岩体中的近场应力、厚层坚硬顶板突然断裂产生的远场动载应力和煤岩体中赋存的瓦斯压力,3者共同作用下诱发复合灾害发生。超高压水射流“横切纵断”技术,“横切”是指从煤层赋存层位水平方向上切割煤层卸压增透,“纵断”是指从煤层顶板垂直方向上切割预裂坚硬厚层顶板,改变煤层与顶板结构的同时,降低煤岩体的应力值和瓦斯压力值。

“横切纵断”技术就是切割煤体降低近场应力、瓦斯压力,切割预裂坚硬厚层顶板降低远场矿震动载荷,防止复合载荷共同作用下的煤岩瓦斯动力灾害发生。诱发复合煤岩动力灾害发生的应力条件为

$$\sigma_s + \sigma_d + \sigma_g \geq \sigma_{bmin} \quad (5)$$

式中, σ_s 为煤岩体近场静载应力; σ_d 为远场动载应力; σ_g 瓦斯压力; σ_{bmin} 为发生动力灾害时的临界应力。

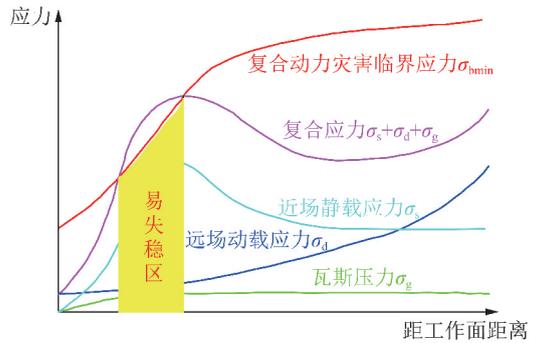


图2 采动区复合应力诱发动力灾害示意

Fig. 2 Schematic diagram of composite stress-induced dynamic disaster in mining area

由式(5)可知,超高压水射流切割煤岩体可减弱采掘空间的近场载荷、瓦斯压力载荷、远场高能矿震载荷,使3者叠加后的载荷大幅降低,不超过煤岩体发生动力灾害时的临界载荷,减弱复合煤岩动力灾害发生率,即超高压水射流防治复合煤岩动力灾害原理,如图3所示。

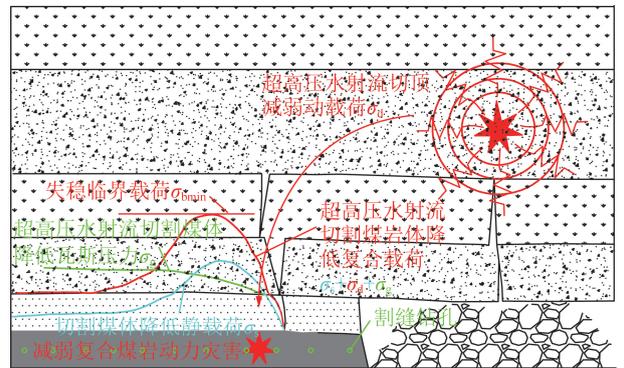


图3 超高压水射流减弱复合动力灾害模型示意

Fig. 3 Schematic diagram of composite dynamic disaster model weakened by ultra-high pressure water jet

煤岩体渗透性方面,超高压水射流切割煤体过程中,煤体受到远场动载应力影响,与自身的近场静载应力、瓦斯压力叠加,煤体中的应力出现升高、降低循环转移过程,煤体内脆性破坏裂隙面的数目、裂隙面相互贯通联接及张开的程度都相应提高,切割缝槽周边煤体发生屈服损伤破坏,煤体渗透率增大。同时,超高压水射流在孔底水楔作用下渗入到缝槽远处的

煤层中,促使压实的煤体产生松动,形成新的裂隙通道,煤层透气性得到提高。渗透性提高的煤体中可解析游离态瓦斯沿切割缝槽迅速释放,负压抽采条件下,瓦斯抽采浓度、抽采纯量大幅提高,降低瓦斯参与的动力灾害程度。

3 超高压水射流切缝实验

为实验研究超高压水射流对煤岩体的切割破碎合理工艺参数,试块由相似模拟材料配比制成的水泥试块(0.5 m×0.5 m×0.5 m)代替,水泥试块强度经物理力学参数实测与井下煤体和顶板的强度近似,实验配比参数见表 1。

表 1 煤岩材料配比参数

Table 1 Proportioning parameters of coal and rock materials		kg			
试样类型	配比质量				
	水泥	水	河砂	石膏	
坚硬岩层	19.2	17.3	21.3	—	
煤层	18.6	26.4	28.6	15.4	

超高压水射流实验系统,额定工作压力 100 MPa,电机功率 250 kW,最高工作压力水射流流量为 132 L/min,钻杆旋转速度 60 r/min。当选用直径小于 2.5 mm 的喷嘴进行射流实验时,高压水射流雾化严重,切割能力大大减弱,当选用直径 2.5 mm 的喷嘴切割时,达到较好的切割效果。实验得到高压水射流切割煤层的工艺参数:切割压力 70~100 MPa(根据煤层坚固性系数 f 值不同,选择不同的割缝压力),喷嘴直径 2.5 mm,钻杆旋转速度 60 r/min,单刀割缝时间为 8 min。

针对顶板切割的难题,选取不同的射流压力,对配比强度类似顶板强度的试块进行切割实验。实验射流压力为 70 MPa,喷嘴直径 2.5 mm,钻杆旋转速度 60 r/min,割缝时间为 10 min,割缝宽度 3~5 cm,割缝深度为 56 cm;当射流压力为 80 MPa,喷嘴直径 2.5 mm,钻杆旋转速度 60 r/min,割缝时间为 10 min 时,割缝宽度 3~6 cm,割缝深度为 74 cm。割缝效果如图 4 所示。

当射流压力为 90 MPa,喷嘴直径 2.5 mm,钻杆旋转速度 60 r/min,割缝宽度 3~6 cm,割缝深度为 124 cm;当射流压力为 100 MPa,喷嘴直径 2.5 mm,割缝时间为 10 min,割缝宽度 3~6 cm,割缝深度为 152 cm。割缝效果如图 5 所示。

超高压水射流切割顶板岩层工艺参数为:切缝压力 100 MPa,钻杆旋转速度 60 r/min,喷嘴直径

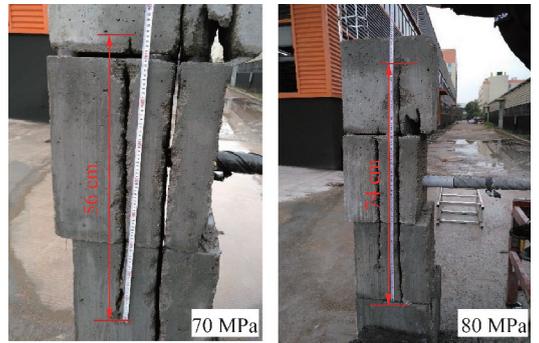


图 4 70,80 MPa 射流压力割缝深度

Fig. 4 Slotting depth under 70 MPa and 80 MPa water jet pressure



图 5 90,100 MPa 射流压力割缝深度

Fig. 5 Slotting depth under 90 MPa and 100 MPa water jet pressure

2.5 mm,单刀割缝时间为 10 min。

4 超高压水射流切煤岩数值分析

为了得到超高压水射流钻孔之间及钻孔内部切割的工艺参数,结合实验室测试结果,根据现场试验地点中煤集团新集二矿 2201 采区 220108 工作面 1_上 煤层赋存条件及煤岩体参数,采用 FLAC^{3D}, Comsol, UDEC 软件建立高压水射流孔内切割间距及钻孔切缝间距数值模型,煤岩物理力学参数见表 2,煤的抗压强度为 12.5 MPa,煤的抗拉强度为 0.83 MPa,煤基质的弹性模量为 8 139 MPa,煤体骨架体积模量为 10 335 MPa,初始裂隙孔隙率为 0.012,甲烷的摩尔质量为 0.016 kg/mol。分析煤体切缝钻孔的煤体应力变化、割缝抽采效果、顶板弱化卸压效果,结合实验优化确定高压水射流横切煤层及纵断顶板合理工艺参数,为井下工业性试验提供依据。

4.1 钻孔内不同切缝间距分析

煤体不同切缝间距模拟最大主应力如图 6 所示,切缝后钻孔周围卸压效果明显,随着切缝间距增大,拉剪塑性区范围增大,卸压空间范围增大。切缝间距为 1 m 时,卸压范围为 6 m;切缝间距为 2 m 时,卸压范围为 8.5 m;切缝间距为 3 m 时,卸压范围为 7.9 m。

表2 煤岩层物理力学参数
Table 2 Mechanical parameters of strata

岩性	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
中细砂岩	43.75	5.78	2 700	12.70	7.62	9.50	35.5
中砂岩	41.05	4.26	2 650	5.63	2.90	7.80	40.3
细砂岩	45.80	3.45	2 540	12.79	10.82	5.50	35.0
泥岩	18.80	1.29	2 430	3.71	1.33	2.52	29.7
1 _上 煤	12.50	0.83	1 390	2.78	1.00	1.65	25.3

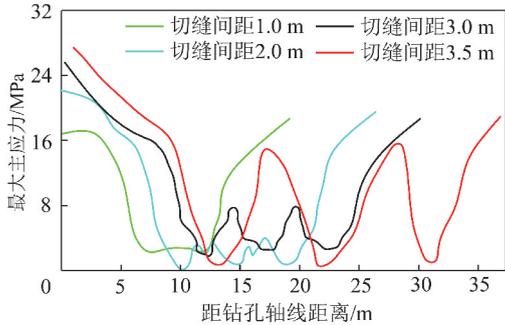


图6 不同切缝间距的最大主应力分布

Fig. 6 Maximum principal stress distribution with different distance between drillholes

当割缝间距增加到3.5 m时,钻孔内切割缝槽周围主应力分布范围逐渐分离,钻孔内重新出现应力集中现象,钻孔内卸压范围不再增大。钻孔内切割间距越小,切割缝槽周围卸压越充分,但是割缝工程量大,考虑经济效益,满足卸压增透的前提下,钻孔内割缝间距应在2 m时最优。

如图7所示,当钻孔内割缝间距为1,2,3 m时,割缝卸压抽采后瓦斯压力明显降低,瓦斯压力基本小于0.74 MPa,同时渗透性增大,抽采效果较好。当钻孔内割缝间距为3.5 m时,瓦斯压力仍大于0.74 MPa,卸压抽采后未能有效消除突出灾害,综合分析,切缝间距分布在2 m时,钻孔内切缝效果最佳。

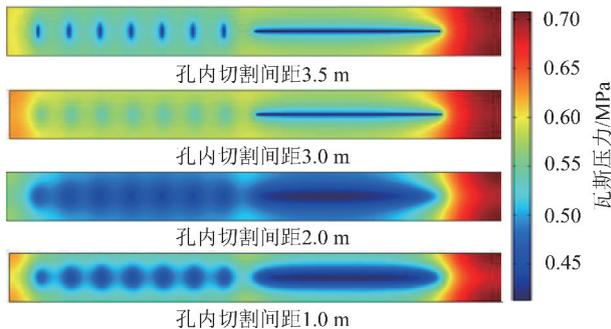


图7 不同切缝间距卸压抽采后瓦斯压力分布

Fig. 7 Gas pressure distribution after pressure relief and extraction under different slit spacing

4.2 不同钻孔间距切缝分析

如图8所示,当钻孔间距为6~10 m时,割缝钻孔之间的应力降低明显,当割缝间距为12 m时,切割煤体后,钻孔之间的应力高达30 MPa,应力集中系数高达1.8,未达到卸压效果。综合考虑煤体顺层钻孔工程量,切割钻孔间距为8 m最优。

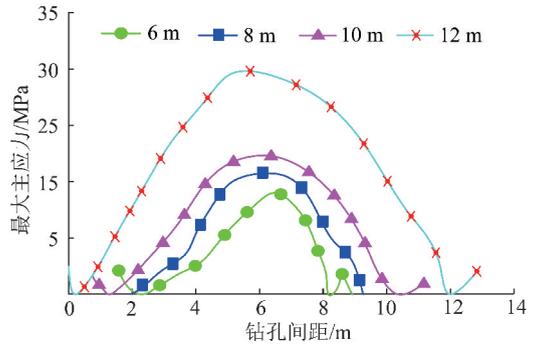


图8 不同割缝间距钻孔之间的应力分布

Fig. 8 Stress distribution diagram between bores with different slits

综上所述,初步得到煤体钻孔内切缝间距应为2 m;根据煤体硬度不同,切缝压力70~100 MPa均可,切缝压力越大,卸压范围越大。煤体切缝顺层长钻孔间距为8 m最优。

4.3 切割弱化顶板分析

综合分析试验地点来压步距等地质条件,建立顶板钻孔切割间距为11 m和18 m两个模型。切割弱化顶板后,顶板应力曲线如图9所示,顶板均匀垮落效果如图10所示。

当切割间距为18 m时,从开切眼开始至工作面后方80 m产生了较大的应力峰值,最大值高达40 MPa,而工作面后方80 m范围内基本没有应力恢复点,说明顶板产生了大面积悬空,切顶效果不理想。当切割间距为11 m时,工作面后方每隔20 m左右存在应力恢复的峰值,且应力增长缓慢,说明切顶后顶板呈小范围均匀垮落。高压水射流切割顶板岩体切缝压力为100 MPa最佳,单刀切缝时间10 min,切割钻孔间距为11 m。数值分析结合实验综合确定新集

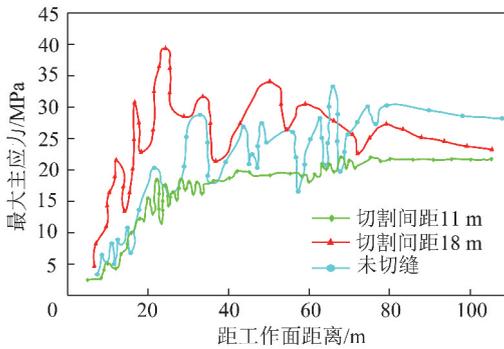


图9 不同钻孔切割间距顶板应力分布

Fig. 9 Stress distribution diagram of different drilling cutting distance of coal seam roof

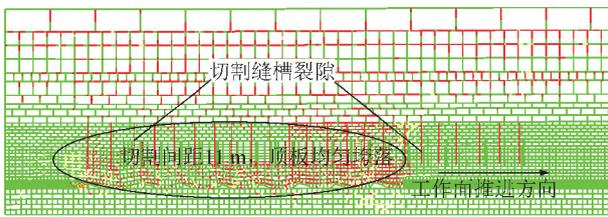


图10 切割预裂后顶板均匀垮落效果

Fig. 10 Effect of even roof collapse after cutting and pre-cracking

二矿 220108 工作面横切煤层参数: 钻孔内割缝间距 2 m、割缝压力 70~100 MPa、钻杆旋转速度 60 r/min、割缝钻孔间距 8 m、单刀切缝时间 8 min; 纵断顶板参数: 钻孔内切割间距 2 m, 切缝压力 100 MPa,

钻杆旋转速度 60 r/min, 切缝钻孔间距 11 m, 单刀切缝时间 10 min。研究获得的工艺参数可为新集二矿 220108 工作面横切煤层纵断顶板复合灾害防治实践提供依据。

5 复合动力灾害防治实践

试验点中煤新集二矿 220108 工作面位于二水平西翼 2201 采区, 工作面埋深 566~646 m, 走向长 1 280 m, 面长 205 m, 所采 1_{\perp} 煤层倾角 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$, 平均 5° , 煤厚 3.4 m, 煤层上方赋存厚度 26.6 m 的砂岩。

220108 工作面实测 1_{\perp} 煤层原始瓦斯压力最大为 1.65 MPa, 1_{\perp} 煤层为突出煤层。实测 1_{\perp} 煤层动态破坏时间为 348 ms, 弹性能指数为 3.21, 冲击能指数为 3.07, 单轴抗压强度为 13.47 MPa。同时 1_{\perp} 煤层上方约为 26 m 厚的砂岩顶板, 实测砂岩顶板弯曲能量指数为 63.3 kJ, 试验区 220108 工作面煤层及其顶板均具有弱冲击倾向性, 工作面具备发生突出、冲击地压复合煤岩动力灾害的条件。

5.1 超高压水射流切割煤层及顶板方案

5.1.1 横切煤层方案

根据确定的横切煤层工艺参数, 在 220108 工作面运输巷选取 1~50 号为割缝考察钻孔, 钻孔间距 8 m; 在距割缝区域 80 m 处, 设计 51~175 号未割缝钻孔, 如图 11 所示。

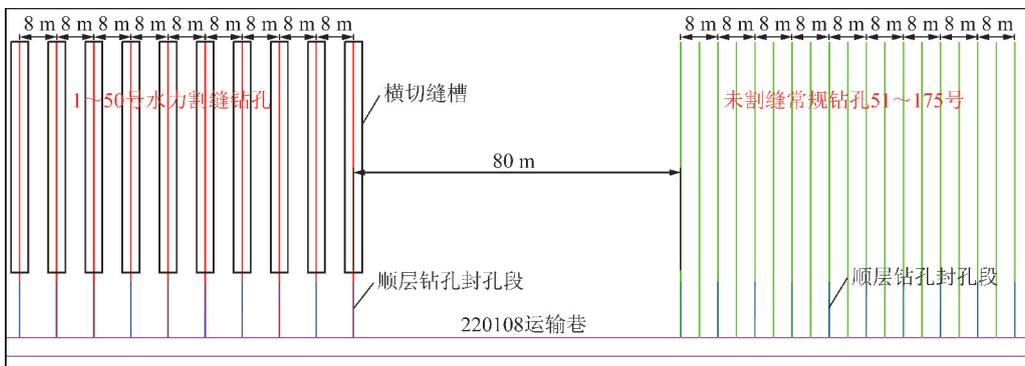


图11 220108 工作面横切煤层示意

Fig. 11 High pressure water jet cross-cutting coal seam schematic of 220108 working face

通过对比瓦斯抽采效果验证割缝效果, 进而形成横切煤层工艺技术消除煤与瓦斯突出灾害。用带有高压密封钻杆的钻机施工煤层顺层钻孔 80 m, 钻孔深部 60 m 煤段采取旋转切割模式, 孔内每间隔 3 m 割 1 刀, 单刀割缝时间 8 min, 单孔割缝时间为 2.0~3.5 h, 平均单孔割缝时间 3 h, 钻孔周边形成一定宽度和高度的椭圆缝槽空间。钻孔浅部 20~5 m 煤段采取横切煤层方式, 使钻孔两侧煤体形成一定宽度和高度的扁平卸压抽采缝槽, 钻孔最浅部 5 m 煤段考虑

到巷道支护等条件不予割缝。

5.1.2 纵断顶板方案

根据确定的切割顶板工艺参数结合 220108 工作面顶板砂岩覆存地质条件, 在 220108 工作面运输巷和轨道巷施工上向穿层钻孔, 钻孔终孔位置控制到 1_{\perp} 煤层上方坚硬厚层砂岩顶板厚度的 $2/3$ 处, 每组 4 个钻孔, 如图 12 所示。

采用获得的超高压水射流切割顶板工艺参数结合试验区采掘地质条件, 对坚硬厚层砂岩进行旋转切

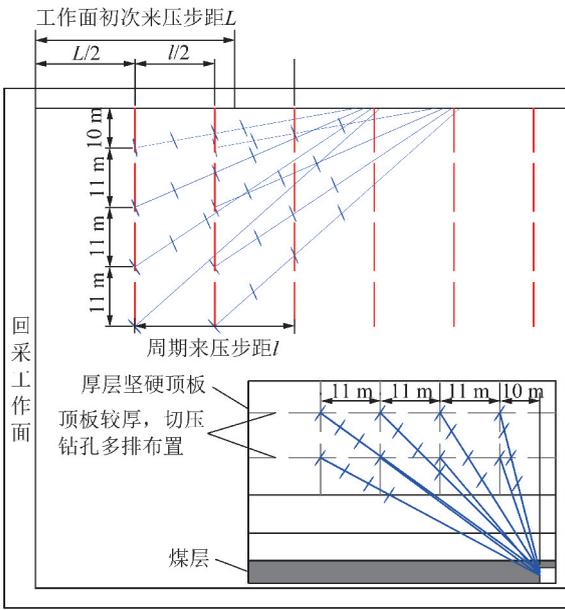


图 12 220108 工作面纵断顶板示意

Fig. 12 High pressure water jet cutting top plate schematic of 220108 working face

割, 钻孔间距 11 m, 钻孔内间隔 2 m 切割 1 次, 单刀切割时间 10 min。

5.2 复合灾害防治效果

5.2.1 横切煤层防治效果分析

220108 工作面运输巷 50 个顺层割缝钻孔, 每个钻孔内割缝 15~20 刀, 平均排水量 58~72 L/min, 割缝后形成缝槽半径经计算为 2.30~2.56 m, 卸压增透空间显著, 经测试原始透气性系数为 $0.03861 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$, 切缝后测得 1_{\perp} 煤层透气性系数为 $1.1583 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$, 煤层透气性系数比原始煤层透气性提高近 30 倍。

从图 13 中可看出, 割缝钻孔单孔平均抽采纯量最大为 $0.28 \text{ m}^3/\text{min}$, 最小为 $0.15 \text{ m}^3/\text{min}$, 平均为 $0.19 \text{ m}^3/\text{min}$; 未割缝钻孔单孔平均抽采纯量最大为 $0.10 \text{ m}^3/\text{min}$, 最小为 $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$, 平均为 $0.059 \text{ m}^3/\text{min}$ 。单孔平均抽采纯量割缝钻孔是未割缝钻孔的 3.5 倍, 采用超高压水力割缝后钻孔工程量减少 60%, 抽采达标时间缩短 38%。

经现场实测试验区残余瓦斯压力为 0.25 MPa, 煤体两帮布置钻孔应力计实测割缝区域煤体支撑压力为 16.5 MPa, 未割缝区域支撑压力为 25.4 MPa, 降低 35%, 煤体卸压效果明显。

5.2.2 纵断顶板防治效果分析

如图 14 所示, 未切割顶板区域顶板来压表现为分段式突然来压, 回采过程中悬顶, 顶板突然断裂导致液压支架工作阻力由 12.5 MPa 陡升至 39.5 MPa, 工作面液压支架和两巷超前支护单体载荷明显增大。

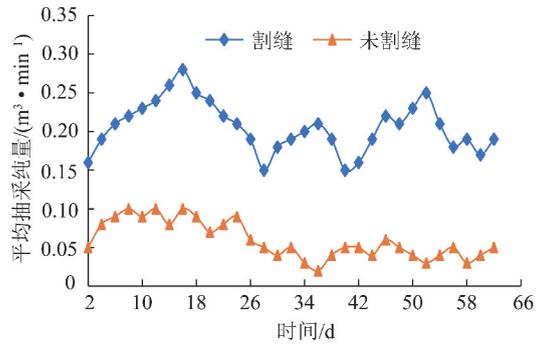
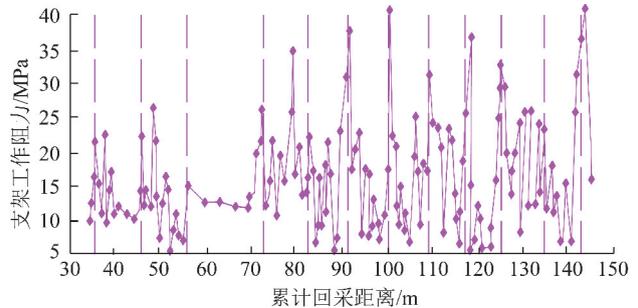


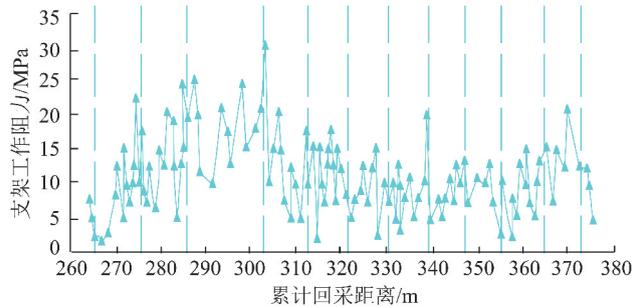
图 13 割缝钻孔与未割钻孔单孔平均抽采纯量变化曲线

Fig. 13 Variation of gas drainage of drillholes that has high pressure water jet and thus do not

采取高压水射流切割预裂顶板区域, 未出现大面积悬顶, 顶板缓慢均匀垮落, 支架工作阻力大部分分布在 20~25 MPa, 矿压显现缓和, 表明超高压水射流切割预裂砂岩顶板效果显著。



(a) 未切割顶板区域, 大面积悬顶后顶板急剧垮落



(b) 切割顶板区域, 预裂弱化顶板后缓慢下沉垮落

图 14 220108 工作面回采液压支架工作阻力曲线

Fig. 14 Mining hydraulic support working resistance curve of 220108 working face

6 结 论

(1) 复合煤岩动力灾害是近场静载应力、远场厚层坚硬顶板急剧垮落诱发的动载应力及瓦斯压力共同诱发, 超高压水射流横切煤层、纵断顶板技术可降低煤岩体中的应力、瓦斯压力, 减弱复合煤岩动力灾害的发生。

(2) 地面实验结合数值分析获得了高压水射流横切煤层、纵断顶板合理工艺技术参数: 切割压力为 70~100 MPa, 钻孔内切割间距 2 m, 射流喷嘴直径

2.5 mm,单刀切割时间为 8~10 min;切割煤体抽采瓦斯纯量提高 3.5 倍,有效抽采瓦斯时间缩短 38%,切割弱化坚硬厚层顶板,工作面液压支架工作阻力分布在 20~25 MPa,厚层坚硬顶板均匀垮落,未出现高能量远场动载荷冲击采场现象。

(3)高压水射流切割煤岩体较大范围改变煤体及厚层坚硬顶板的围岩裂隙状态,渗透率增大,增加煤体中瓦斯解析自由面,提高瓦斯抽采率,高效抽出瓦斯防治煤与瓦斯突出灾害,同时切割预裂坚硬厚层顶板,弱化顶板围岩,避免大面积悬顶突然垮落诱发动载荷冲击,有效提高煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化灾害防治。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 48-59.
DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 48-59.
- [3] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 矿井群冲击地压发生机理与控制技术探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 141-150.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Discussion on the mechanism and control of coal bump among mine group[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 44(1): 141-150.
- [4] 朱丽媛, 潘一山, 李忠华, 等. 深部矿井冲击地压、瓦斯突出复合灾害发生机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3042-3050.
ZHU Liyuan, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Mechanisms of rockburst and outburst compound disaster in deep mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3042-3050.
- [5] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567-1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [6] 卢义玉, 贾亚杰, 葛兆龙, 等. 割缝后煤层瓦斯的流-固耦合模型及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 23-29.
LU Yiyu, JIA Yajie, GE Zhaolong, et al. Coupled fluid-solid model of coal bed methane and its application after slotting by high-pressure water jet[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 23-29.
- [7] 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.

- HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, CHEN Shuliang, et al. Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in under-ground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2954-2970.
- [8] 张嘉勇, 郭立稳, 罗新荣. 高压水射流掏槽防突技术参数数值模拟与试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 785-790.
ZHANG Jiayong, GUO Liwen, LUO Xinrong. Parameters of high-pressure water jet punching technology in outburst prevention[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 785-790.
- [9] 刘勇, 卢义玉, 李晓红, 等. 高压脉冲水射流顶底板钻孔提高煤层瓦斯抽采率的应用研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1115-1119.
LIU Yong, LU Yiyu, LI Xiaohong, et al. Application of drilling in roof or floor with high pulse pressurewater jet to improve gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1115-1119.
- [10] 杨增强, 窦林名, 刘畅, 等. 深井巷帮煤体冲击机理及水射流卸压技术应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 670-677, 729.
YANG Zengqiang, DOU Linming, LIU Chang, et al. Mechanism of rock burst in roadway side wall and the application of water jet pressure relief technology in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 670-677, 729.
- [11] 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 803-811.
DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, et al. Monitoring and pre-warning of rockburst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 803-811.
- [12] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55-69.
LU Yiyu, GE Zhaolong, LI Xiaohong, et al. Investigation of a self-excited pulsed water jet for rock cross-cutting to uncover coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 55-69.
- [13] 张建国, 林柏泉, 翟成. 穿层钻孔高压旋转水射流割缝增透防突技术研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 411-415.
ZHANG Jianguo, LIN Baiquan, ZHAI Cheng. Research on outburst prevention technology of high pressure hydraulic-cutting seam through layer and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 411-415.
- [14] 李晓红, 卢义玉, 赵瑜, 等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1386-1390.
LI Xiaohong, LU Yiyu, ZHAO Yu, et al. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1386-1390.
- [15] 朱红青, 张民波, 朱帅虎, 等. 脉动孔隙水压下三轴加压对煤岩损伤变形的影响[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2137-2143.
ZHU Hongqing, ZHANG Minbo, ZHU Shuaihu, et al. Effect of tri-axial compression on damage deformation of coal rock under pulsed pore water pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8):

- 2137-2143.
- [16] 卢义玉,丁红,葛兆龙,等.空化水射流热效应影响煤体渗透率试验研究[J].岩土力学,2014,35(5):1247-1254.
LU Yiyu, DING Hong, GE Zhaolong, et al. Experiment study of effect of coal permeability under thermal effect of cavitation water jets[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5):1247-1254.
- [17] 葛兆龙,梅绪东,贾亚杰,等.高压水射流割缝钻孔抽采影响半径研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):627-664.
GE Zhaolong, MEI Xudong, JIA Yajie, et al. Influence radius of slotted borehole drainage by high pressure water jet[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4):627-664.
- [18] 袁志刚,任梅清,沈永红,等.穿层钻孔煤巷条带水力压裂防突技术及应用[J].重庆大学学报,2016,39(1):72-78.
YUAN Zhigang, REN Meiqing, SHENG Yonghong, et al. Hydraulic fracturing technology by drilling through strata for outburst prevention in coal roadway strips and its application[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1):72-78.
- [19] 黄飞,卢义玉,李树清,等.高压水射流冲击速度对砂岩破坏模式的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2259-2265.
HUANG Fei, LU Yiyu, LI Shuqing, et al. Influence of velocity of high-pressure water jet on failure patterns of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11):2259-2265.
- [20] 姜文忠.低渗透煤层高压旋转水射流割缝增透技术及应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2009:36-42.
JIANG Wenzhong. Research on theory of slotting and enhancing permeability by high pressure rotational jetting in low permeability coal seam and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009:36-42.