

冲击地压关键层远程区域水力压裂防治技术

黄澎涛

(中煤地质集团有限公司,北京 100040)

摘要:针对我国目前冲击地压防治工程人员身处冲击危险区域,无法实现区域先行、超前治理的局面,论文提出了矿井冲击地压关键层远程钻孔水力压裂防治技术。分析了我国冲击地压矿井的地质条件和近几年重大冲击地压灾害的特点,认为华北石炭—二叠系煤田和侏罗系煤田很多冲击地压煤矿煤层上覆地层,普遍发育厚层坚硬的砂岩关键层,能量的释放符合冲击地压形成的“3因素”理论。经论证,关键层脆性强,硬度大,易于压裂,利用水力压裂法解除地应力是合适的;井下长钻孔、地面深孔和地面导斜钻孔的施工技术和钻孔水力压裂技术已成熟,实现远程钻孔水力压裂区域性的防治冲击地压是可行的。工业性试验显示,井下长钻孔顺层分段水力压裂长度可达800 m,水压可达40 MPa,裂缝半径为40 m;地面垂直钻孔分段压裂深度可达3000 m,压裂段高>100 m,压力达80 MPa,裂缝半径为100~200 m;地面导斜钻孔水平顺层段长度达1000 m,压力达80 MPa,裂缝半径为100~150 m;压裂前后煤体应力或支架压力的检测数据对比显示,压裂后的应力较压裂前降低了10 MPa以上,满足区域治理的要求,钻孔远程水力压裂在防治冲击地压上较传统方法具有显著超前优势、区域优势、效率优势、安全优势和环保优势,可以做到冲击地压防治区段的无人化,满足区域先行、超前治理的国家要求。

关键词:冲击地压;远程治理;水力压裂;区域防治;关键层;钻孔压裂

中图分类号:TD324 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0187-08

Control technology for critical rock burst formations by distant and large scale hydraulic fracturing

HUANG Pengtao

(China Coal Geology Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: In view of the situation that rock burst control workers still work in hazardous areas underground, and the requirement that regional control of rock burst goes ahead of underground works cannot be met, the technology for key formation treatment by distant hydraulic fracturing through boreholes to relieve rock burst is put forward. By analyzing the geological conditions in the coal mine threatened by rock bursts and the hazardous characteristics of rock bursts happened in the recent years, it is understood the critical rock burst formation of massive hard rock is commonly developed in the roof of the coalbed, and the energy release in rock burst hazards meets the requirements of the “3 factors” theory on rock burst in north China C-P coal field and Jurassic coal field. According to rock mechanic analysis, the hard and brittle critical formation is easy to fracture. The technology to release rock stress in the key formation by hydraulically fracturing is suitable. Since drilling technologies for underground long boreholes, deep holes and directional holes from surface have been technically proven, distant rock burst control in large scale by hydraulic fracturing in long borehole is feasible. The industrial tests showed that underground long borehole can be stage-fracture up to 800m at 40MPa with fracture half-length upto; the vertical borehole drilled from surface can be as deep as 3000m with fracture segment greater than 100m at hydraulic pressure of 80MPa with fracture half-length about 100~200m long; the surface directional borehole can be drilled with the in-seam section as long as 1000m with hydraulic up to 80MPa with fracture

收稿日期:2021-05-31 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2021.S1.030

作者简介:黄澎涛,男,汉族,1984年生,高级工程师,主要从事煤田地质、水文地质和工程地质勘查和科研工作,北京市石景山区玉泉路59号院3号楼,852069797@qq.com。

引用格式:黄澎涛.冲击地压关键层远程区域水力压裂防治技术[J].钻探工程,2021,48(S1):187-194.

HUANG Pengtao. Control technology for critical rock burst formations by distant and large scale hydraulic fracturing[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):187-194.

half-length about 100~150 m. Analysis showed the pressure on coal seam or on shelf after fracturing was about 10MPa less than that before fracturing. Compared with conventional methods, the technology for key formation treatment by distant hydraulic fracturing through boreholes to release rock burst distantly have many advantages in regional and ahead control, engineering efficiency, safety and environment protection. The unmanned condition in the area threatened by rock burst can be realized in the hazard controlling process, and the requirement of regional and ahead control can be met.

Key words: rock burst; distant control; hydraulic fracture; regional prevention; key formation; borehole fracture

0 引言

煤矿冲击地压关键层远程水力压裂是指在冲击地压危险区以外对煤层顶板关键层采用钻孔水力压裂解除地应力,进而解危冲击地压的技术。国家《防治煤矿冲击地压细则》第五十四条指出“冲击地压危险区域实施解危措施时,必须撤出冲击地压危险区域所有与防冲施工无关的人员……”。这说明在冲击地压危险区从事冲击地压解危的工作人员已经处于危险境地。2018年10月20日,山东龙郛煤业发生冲击地压灾害,21名遇难者就是冲击地压防治人员。因此探索冲击地压危险区的冲击地压解危方法是实现危险区无人化、保障包括防冲人员在内的井下工作人员安全的有效途径。

我国科技人员对矿井冲击地压的防治研究已经有70年的历史^[1-2],采用的方法主要有主动解除和被动防护2种。主动解除主要有深孔断顶爆破、断底爆破、顶板水力压裂、煤层注水、钻孔卸压、开掘疏压硐室等方法。各种措施的使用情况如图1所示。由图可见,钻孔卸压和煤层注水为主要方法,而水力压裂方法应用较少。

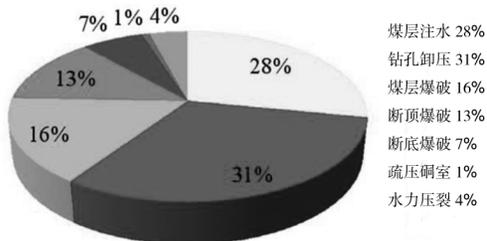


图1 矿井冲击地压解危技术构成图^[3]

被动防护主要是支护和防护方法。通过采用“四高”锚杆(索)支护,结合套管和注浆技术,有效抑制巷道的变形,增加劣化煤岩体的完整性,在围岩中形成预应力抗冲击支护结构^[4-5];同时在巷道空间内

架设钢棚、防护网等吸能装备,泡沫金属、橡胶垫层或枕木等吸能材料,或在围岩内预留一定的缓冲吸能空间来吸收冲击动能^[6]。最近吴拥政等提出了“卸压—支护—防护协同防控”理念^[7],通过水力压裂使得远、近场卸压,然后再通过预应力锚固支护及吸能装备防护,减小冲击震级,抑制围岩强度劣化,进而控制深部冲击地压巷道的冲击破坏。这种方法可将冲击地压的主动解危和被动防护结合起来。

目前,上述方法已广泛应用于矿山地压防治中,但是缺点是防治工程都必须在冲击地压的危险区开展,使得解危的工程技术人员处于危险之中。因此中煤科工集团北京研究院、西安研究院和中煤地质集团等单位率先开展了冲击地压远程钻孔水力压裂区域防治研究,分别在鄂尔多斯布尔台煤矿、山东东滩煤矿进行了工业性试验,取得了实质性成果。

1 水力压裂应用和研究现状

水力压裂最早起源于1947年美国堪萨斯州霍顿气田的Kelper-1井的增渗^[8],后来在石油、天然气和煤层气开发得到了广泛的应用。

在理念研究方面,1981年,黄荣博教授研究了地层的起裂压力并给出了计算公式^[9];1994年,余雄鹰等根据最大拉应力破裂准则建立了裂缝起裂压力和裂缝方位的控制方程^[10];2003年,张广清等^[11]研究了射孔对裂缝起裂压力的影响,并依靠线弹性断裂力学理论进行计算、模拟和预测裂缝的延伸。C. E. Austin等^[12]研究了裂缝尖端塑性效应对裂缝延伸的影响,并给出了裂缝尖端塑性性区的张开半径计算公式。И.М. 别秋克提出了煤体水力破裂的假说,认为水力压裂的起裂压力大于煤岩的强度即可^[13]。Bjerrum等^[14]得出了水力劈裂沿最小主应力面的方向发生的结论。一些学者认为水力劈裂破坏属于剪切破坏,Fukushima研究认为在假设应力在任意方向上线性分布的前提下,水力劈裂破坏准则可用摩

尔-库仑准则代替^[15]。黄炳香等^[16],吴拥政等^[17]用大尺寸真三轴物理模拟试验系统模拟地层条件,研究了岩体水力劈裂裂纹的走向及裂纹宽度的影响因素。

在应用实践方面,几十年间已经有超过150多万井次压裂作业^[18],水力压裂技术有了长足的发展,以美国的哈里伯顿、BJ公司、STEWART & STEVENSON 等公司为代表的科研与生产团队形成了以压裂泵车、混砂车、仪表车、管汇车及辅助设备的配套系统^[19]。压裂工艺也从垂直井发展到水平钻孔,单封隔器分层压裂发展到套管滑套多层分压裂技术^[20]。

压裂效果观测与评价也取得了同步发展。目前国内外采用的压裂裂缝监测方法主要有大地电位法^[21]、井温法^[22]、同位素测井法^[23]、微震监测^[24]等。其中既可用于孔-井,又可用于孔-地微地震监测技术在压裂检测应用更为广泛。压裂效果评价是仪器和软件相结合的结果。压裂效果评价包括压裂液压力要求、裂隙张开条件、裂隙扩展尺寸计算、压裂液流量控制等。从这些研究中产生了各种各样的数学模型,例如著名的Carter一维渗流模型,KGD二维垂直裂隙扩展模型、伪三维模型P3D、LDEC和FRANC3D三维模型。

总之,经过70多年的发展,水力压力从压裂机理、压裂技术到检测技术和评价方法形成了一套完整的技术体系。

2 矿井冲击地压的关键层成因及远程区域防治的适用条件

2.1 冲击地压的关键层成因

目前我国尚无冲击地压分类标准,但齐庆新等提出的冲击地压成因的“3因素”理论^[25],即“物性因素”、“应力因素”和“结构因素”已被广泛接受。不论潘一山等的煤体压缩型冲击地压、顶板断裂型冲击地压和断层错动型冲击地压^[26]3种类型划分,还是窦林名等的煤柱型、坚硬顶板型、褶曲构造型和断层型^[27]4种类型划分,还是谭云亮等^[28]的深部应变型、断层滑移型和坚硬顶板型3种类型划分,还是潘俊锋等^[29]的深部动静载叠加型、深部高静载加载型、深部高静载卸荷型3种类型划分,还是姜耀东等的材料失稳型冲击地压、滑移错动型冲击地压和结构失稳型冲击地压的3种类型,在成因上都与“3因素”

有关。而3因素中的应力因素和结构因素都隐含着煤层顶板的“关键层”。

关键层是顶板存在难以垮落的坚硬地层,易聚集地应力。我国华北煤田新汶、巨野矿区顶板发育着巨厚的砂岩顶板,义马、鄂尔多斯、新疆准东矿区都发育着巨厚的侏罗—白垩系砂岩地,均构成关键层,因此,冲击地压频繁发生,严重地威胁着矿井的安全生产。

关键层难以垮落或弯曲,极易出现较大的空顶距。据公式分析,弹性能和岩层的空顶长度的5次方呈正比:

$$U_w = \frac{q^2 L^5}{8EJ} \quad (1)$$

式中: U_w ——顶板弯曲弹性能; q ——顶板质量与上覆岩层附加荷载的单位长度折算荷载; J ——顶板的断面惯矩; E ——岩层的杨氏模量; L ——空顶距。

上式显示,弹性能和 L 的5次方呈正比。一般来说,厚度越大的岩层,越不容易垮落,空顶距 L 也越大,厚层砂岩和火成岩床的厚度都很大,因此关键层是冲击地压形成的关键因素。

2.2 远程区域防治的适用条件

“3因素”理论认为,区域方法是冲击地压防控的首选方法,能够改变“应力因素”和“结构因素”。除了对开采工作面进行合理的布局外,就是通过对矿井或采区的坚硬厚岩层实施地面或井下断裂,使煤岩体承载结构发生改变,实现对“结构因素”的控制,使得顶板应力无法集中。当然,实施顶板断裂的同时,也改变了其积聚弹性能的能力,在一定程度上“物性因素”也得到了控制。通常情况下,区域防控方法大多是在开拓前开展的工作,从矿井及采区等尺度上开展防控工作,以达到冲击危险区的远程防治目的。顶板关键层区域远程钻孔水力压裂是实现这一目标的最佳方法。

华北煤田许多冲击地压的煤矿都具备坚硬顶板厚层砂岩的地质条件,都是采后大面积悬顶使得弹性能大幅度聚集。部分冲击地压煤矿顶板的关键层如表1所示。侏罗系煤田普遍存在着巨厚的侏罗—白垩系砂岩关键层,是冲击地压的关键因素,如表2。由此可见,区域远程钻孔水力压裂防治冲击地压的方法有着广泛的适用性。我国近3年来重大的冲击地压灾害的事故分析,证明了区域远程钻孔水力压裂防冲方法有着广泛的适用性。

表1 我国华北C-P煤田主要冲击地压矿井顶板岩层物理力学性质

矿井	顶板岩层种类	厚度/m	单向抗压强度/MPa	弹性模量/(10 ⁴ MPa)	冒落性	超前支承压力影响范围/m
天池矿	长兴灰岩	20	148	5.2~6.8	难冒	20
门头沟矿	中粒石英砂岩	10~20	130~190	6.1~6.8	难冒	20~30
陶庄矿	中粒石英砂岩	10~40	130	4.3	难冒	30~40
龙凤矿	油母页岩	100~200	200	3.6~4.5	较难	15~20
唐山矿	砂岩	44	137	1.8	较难	25~30
房山矿	细砂岩	20~30	174	6.4~6.9	难冒	30
忻州窑矿	中粒砂岩	10~15	80~160	4	难冒	60
华丰矿	中砂岩	22~56	68.8	1.93	较易冒	35
东滩矿	中细砂岩	14~24	50~151		较易冒	25~55
三河尖矿	中砂岩	12~13	79~103		较易冒	25~45
华亭矿	灰白色砂岩	12~39	16~96	16.95~38.4	不易冒	
煤峪口矿	中细粉砂岩	15~43	82~134	1.58~2.02	不易冒	

(1)2017年1月17日,中煤担水沟煤业10人死亡事故。事故的地质因素:①顶板存在着厚层砂岩关键层;②上下煤层工作面叠置,布局集中,造成应力叠加;③工作面巷道压力大,变形严重时未采取措施。

(2)2017年11月11日沈阳红阳三矿10人死亡事故。事故的地质因素:①深度大,西三上采区702综采工作面开采深度为1082m,原岩应力高;②煤层具有冲击倾向性;③靠近Fh1、Fh2、Fh3、Fh4、Fh21断层;④702回风顺槽与北二703采区之间煤柱宽度32m,及702综采工作面采动(已推进1740m)等应力叠加影响,使事故区域形成高应力集中区。

(3)2018年10月20日山东龙郓煤业21人死亡事故。事故的地质因素:①3煤层及其顶底板具有冲击倾向;事故区埋深达1027~1067m;③存在砂岩关键层;③3煤层的两分叉煤层合并造成开采厚度增加;④巷道临近贯通,形成应力集中区;⑤井下卸压钻孔诱发冲击地压;⑥开采布局不合理造成局部应力集中。

(4)山东新巨龙煤矿2020年2月22日4人死亡事故。事故的地质因素:①FD8断层与深度为985~1010m的工作面形成的三角区应力集中;②上覆岩层存在厚层为18~40m砂岩关键层;③大区域构造应力调整及开采扰动作用,2020年以来,鲁西南地区近南北向断裂带(长垣断裂、中牟断裂、曹县断裂、巨野断裂等)地震活动频繁,工作面推采接近FD8与FD6断层形成的楔形地堑结构区域,构造应力调整和工作面推采扰动,导致地堑区域岩层

沿高倾角断层面滑移。

(5)2019年6月9日吉林省龙家堡矿业冲击地压9人遇难灾害。事故的地质因素:①煤层及顶板均具有冲击倾向性(顶板存在砂岩关键层);②事故区域煤层平均埋深大;③因断层造成水平构造应力增高;④周围采掘活动造成大范围区域应力升高。

上述5个煤矿案例中,4个煤矿存在着顶板砂岩关键层,1名遇难者是冲击地压防治人员,可见远程治理的重要性。

3 试验分析

3.1 井下钻孔顶板关键层远程区域水力压裂技术

试验矿井的主采煤层为侏罗系延安组4-2煤。煤层埋深450~475m,老顶发育24m细砂岩,坚硬难垮。回采过程中,顶板悬顶面积大,来压强度高,工作面巷道底鼓及煤壁片帮严重,工作面支架出现压死、爆缸现象。采用井下长钻孔水力压裂防治技术,设计4个钻孔覆盖工作面,钻孔长393~486m,单孔压裂5段,孔径120mm,工程剖面如图2所示。多点拖动施工3个钻孔,单孔最高压裂9段,压力25.9MPa,初始破裂压力为13.8~24.3MPa。起裂后压力呈锯齿状变化,整体表现为“起裂—周期性微裂缝形成—扩展延伸”,周期压力突降,明显压降80余次,压降3.2~9.0MPa,单段形成多组大规模联通裂隙,微地震检测裂缝顺层半径为40m。

压裂前后周期来压分别为51MPa和40MPa,如图3和图4;压裂后,周期来压平均降低了10

表2 侏罗系煤田冲击地压矿井顶板关键层情况一览表

煤矿名称	分析范围	直接顶岩性 (下→上)	直接顶厚度/m	基本顶岩性 (下→上)	基本顶厚度/m	关键层	关键层厚度/m	关键层到煤层的 距离/m
高家堡煤矿	一盘区	炭质泥岩、泥岩	0~1.4	粗粒砂岩 细粒砂岩	4~25	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	300~521 20~70	宜君组底部距离 煤层顶 181~218.38
胡家河煤矿	401103工作面	泥岩、粉砂岩、 砂质泥岩	1~4	细砂岩、粗砂岩 含砾粗砂岩、含砾粗 砂岩、中砂岩	13.7、20.5、34.2、25.7、 18.2	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	340~380 30.25	140~185 130~150
孟村煤矿	401101工作面	砂质泥岩	3.38	粗砂岩、细砂岩	7.75~20.5	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	340~380 30.25	140~185 130~150
亭南煤矿	207工作面	砂质泥岩	8.52	粉砂岩、细粒砂岩	12.1 19.3	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	280	179.4
小庄煤矿	40204工作面	泥岩、粉砂岩、 细砂岩	0.53~3.88	灰白色中、粗粒砂岩	10~20	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	270~305	186~198
小庄煤矿	40214工作面	细砂岩	1.5	粗砂岩、含砾粗砂岩	20	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	270~305	186~198
雅店煤矿	首采面(1101工作 面)	1煤:粉砂岩、细砂岩 4煤:泥岩、砂质泥岩	1.5~2.32.6	1煤:粉砂岩 4煤:细砂岩	4.6~13.6 6.76~9.42	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层		
崔木煤矿	22盘区	炭质泥岩、泥岩	0.20~3.03	泥岩、铝质泥岩、炭 质泥岩或粉砂岩、细 砂岩、中—粗粒砂岩	1.05~32.13	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	237~312,均270 0~62,均32	194~257,均222 168~203,均190
招贤煤矿	1307工作面	砂泥岩	2~10, 局部达29.87	基本顶砂岩、细砂岩 顶板	6~48.85	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层		
园子沟煤矿	首采面(1012001 工作面)	深灰色泥岩、 砂质泥岩、细粒砂岩	2.00~5.00 2.00~5.00 1.00~2.00	细粒砂岩、粗粒砂岩 含砾粗砂岩	5.45~22.15 3.6~7.30 3.69	洛河组砂岩层 宜君组砾岩层	278.29 44.10	

MPa,压裂后回采工作面煤壁无片帮和压架现象,回采工作面巷道及支架位置底鼓明显降低。

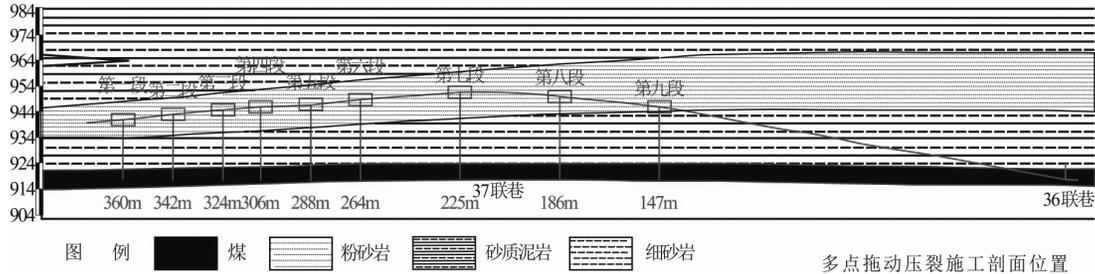


图2 某煤矿42106-1工作面井下钻孔水力分段压裂剖面

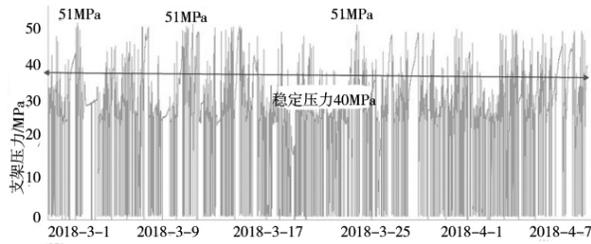


图3 压裂前支架压力显现

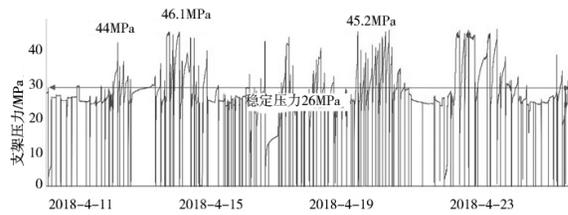


图4 压裂后支架压裂显现

3.2 地面垂直钻孔远程区域水力压裂防治技术

试验矿井煤层顶板存在巨厚的砂岩难以垮落,时常造成矿压显现,被评价为冲击地压矿井。关键层的层位如图5。为了解除63上06工作面的冲击地压采用直井水力压裂方法,钻孔一开深度约125 m(达到基岩10 m以下),孔径311.2 mm;二开至孔深540 m,孔径215.9 mm。根据初步估算,地面直孔压裂半径可达100~200 m,能够满足216 m宽度工作面的要求。

本区域靠近压裂钻孔的最大水平地应力方向为NE150°。一号井的三段压裂层段为:第一段424~530 m,第二段325~424 m,第三段194~325 m。

对压前和压后分别测量了井眼温度。由于压裂液温度(4℃)远低于地层原始温度,使得压裂前后井眼温度发生变化。424~530 m层段压裂后测得井温曲线如图6所示。该层射孔段位于470.3~493.13 m,可见在482 m位置井温出现了第一个拐点,据此确定裂缝的下边界;在220 m处井温出现了第二个拐点,据此推断为裂缝的上边界,综合推断裂缝高度范围为220~482 m。

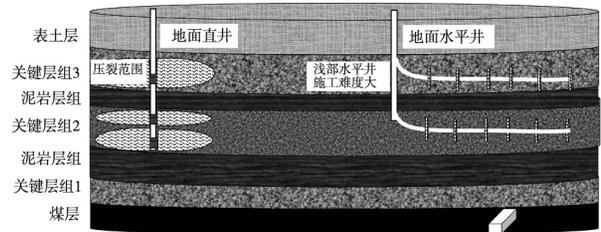


图5 地面钻孔水力压裂地层适用条件

界,综合推断裂缝高度范围为220~482 m。

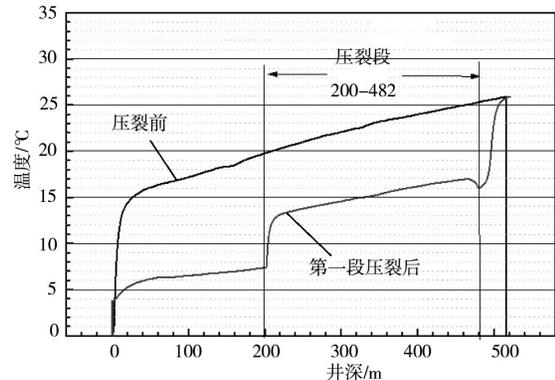


图6 424~530 m井段压裂前后井温曲线

同样,325~424 m层段压裂后测得井温曲线显示裂缝高度范围为200~380 m,194~325 m层段压裂后测得井温曲线显示裂缝高度范围为170~315 m。

压裂前后煤体压力降低了10.02~12.22 MPa,没有出现片帮、缩帮或底鼓等地压显现。

3.3 地面水平导斜钻孔远程区域水力压裂防治技术

试验目的是对顶板直罗组砂岩关键层实施钻孔水平分段水力压裂,解除冲击地压威胁。压裂段长度1000 m,工程布置如图7所示。压裂缝半径100~150 m,压裂前后煤体应力曲线如图8所示,图8显示煤体应力较压裂前发生了显著的降低,没有出现片帮、缩帮或底鼓等地压显现。

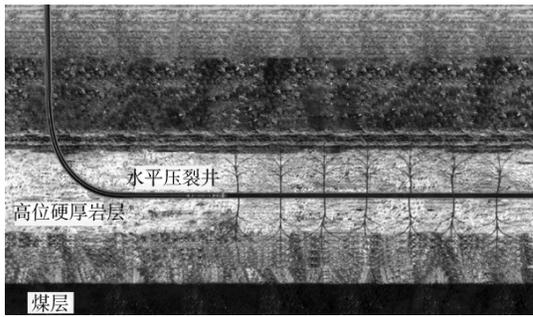


图7 导斜钻孔水力压裂剖面

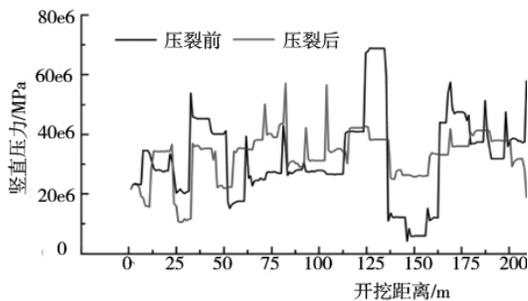


图8 压裂前后媒体应力与工作面推进距离关系

4 钻孔远程区域水力压裂防冲优势

(1)地质条件优势。地面钻孔水力压裂是将高压水大流量地压入关键层,使关键层开裂、裂缝扩展。地层的脆性越大,裂缝开展得越好。关键层破裂就消除或减弱了其在开采期间的应力集中程度,使煤体应力始终处于冲击地压发生的临界应力之下。国家《冲击地压测定、检测与治理方法》规定单一顶板弯曲能量指数按下式计算:

$$U_{wQ} = 102.6R_t^{\frac{5}{2}}h^2/(q^{\frac{1}{2}}E) \quad (2)$$

式中: U_{wQ} ——单一顶板弯曲能量指数,kJ; R_t ——岩石的抗拉强度,MPa; h ——单一顶板厚度,m; E ——岩石的弹性模量,MPa。

可以看出,抗张强度 R 对弯曲能量指数的影响最大,降低 R 的值就可以降低顶板岩石冲击倾向性的等级。水力压裂法功能可消除顶板的 R 值,使其聚集不了弯曲能量。这样,在开采冲击地压煤层前就使采区、工作面冲击倾向性降为最低等级。

(2)超前和区域治理优势。国家《防治煤矿冲击地压细则》第十九条规定冲击地压防治应当坚持“区域先行、局部跟进、分区管理、分类防治”的原则。第五十六条规定“在矿井设计、采(盘)区设计阶段应当先行采取区域防冲措施……”。根据山东东滩煤矿和鄂尔多斯布尔台煤矿地面水力压裂效果,裂缝顺层压裂半径 >150 m,一个水平压裂钻孔可以覆盖一个工作面,如图9,因此地面钻孔

水力压裂属于区域治理,符合区域先行条件。

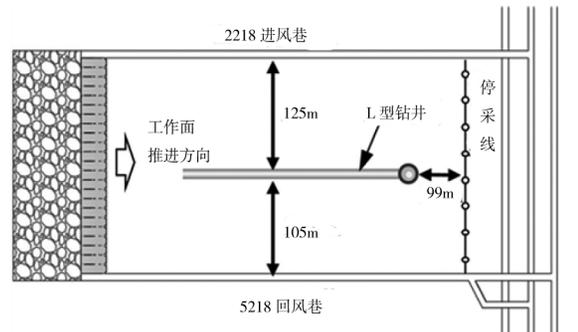


图9 5218工作面水力压裂钻孔布置

(3)治理效率优势。传统的对顶板关键层弯曲能量解除深孔爆破法,由于爆破致裂半径仅为0.75 m,孔间距约为1.5 m,因此破坏顶板需要大量的爆破钻孔。

传统钻孔水力压裂法,裂缝的半径长度一般为4~5 m,中煤间距8~10 m,井下水力压裂法破碎顶板也需要大量的钻孔。

井下导斜钻孔顺层压裂法,裂缝长度为40~60 m,是传统方法的10倍。对于一个工作面需要2个钻孔。

地面导斜钻孔水力压裂法,裂缝半径 $>150\sim 200$ m,是充填方法的30~40倍。一个工作面仅需一个钻孔。1个垂深1000 m,顺层水平长度为1000 m的钻孔,可以在1周时间完成施工;5 d可以完成压裂是充填方法的,所需时间为充填方法的1/26。

(4)安全优势。由于传统冲击地压解危方法使得工作人员身处危险区,人身安全难以保障。远程钻孔区域水力压裂解除冲击地压可使工作人员远离危险区,不受冲击地压的威胁。地面压裂工程虽然具有80 MPa以上的水压,但在压裂期间,压裂现场室外保持无人状态,因此施工安全得以保障。

(5)环保优势。远程钻孔区域水力压裂使用清水为压裂液,对地面和地层都没有污染。钻孔冲洗液的处理在以往的工程中已经有了成熟的方法,不会造成污染。

(6)效果检验优势。效果检验采用宜采用微震检测法。该方法能够实时检测压裂缝的扩展范围,如果压裂缝半长不满足设计要求,则可以最大压力,若仍不满足要求,则表明漏水严重,可以判断岩层裂隙发育,不具备聚集地应力的条件,不需再继续压裂。该方法也可以监测回采过程中岩层的二次破裂情况,若破裂能量大,则说明压裂效果不好,需井下补充少量工程。由于该方法可以在井上下和孔内布局,可以作为地面压裂的配套技术。

5 结论

(1)煤层上覆坚硬关键岩层弯曲弹性能的突然释放是具有关键层煤矿冲击地压的主要成因,符合“3因素”机理和弯曲弹性能判别理论。我国华北石炭一二叠系煤田的很多煤矿煤层顶板都发育着坚硬的厚层砂岩或火成岩床关键层,侏罗系煤田顶板都普遍存在着宜君组合洛河组或直罗组和志丹群巨厚砂岩关键层,当埋藏深度足够大的时候,容易产生冲击地压,给煤矿安全造成重大威胁。仅3年来造成伤亡灾害的冲击地压事故有4/5的矿井煤层顶板发育有关键层,因此,关键层是防控冲击地压的重点对象。

(2)顶板关键层的水力压裂可以消除“3因素”理论中的“应力因素”和“结构因素”,是解除冲击地压威胁的有效方法。远程水力压裂可以脱离冲击地压危险区治理冲击地压,实现冲击地压防治的无人化作业,符合冲击地压防治区域先行、超前治理的原则。关键层硬度大,脆性强,适于水力压裂。因此关键层的钻孔远程水力压裂是防治冲击的最佳方法之一。

(3)钻孔远程水力压裂技术防治冲击地压是可行的。工业性试验显示井下长钻孔和地面导斜钻孔均取得了显著效果。

(4)工业性试验显示钻孔远程水力压裂在防治冲击地压上具有显著超前和区域优势,治理效率优势,安全优势和环保优势。

参考文献:

- [1] 庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
- [2] 李鹏翔.煤层冲击地压防治技术现状研究[J].工业安全与环保,2020,46(5),44-49.
- [3] 马斌文.钻孔卸压防治冲击地压研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2018.
- [4] 潘一山,肖永惠,李国臻.巷道防冲液支护研究及应用[J].煤炭学报,2020,45(1):90-99.
- [5] 红普,吴拥政,何杰,等.深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J].煤炭学报,2015,40(10):2225-2233.
- [6] LI C C. A new energy absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010,47(3):396-404.
- [7] 吴拥政,付玉凯,何杰,等.深部冲击地压巷道“卸压一支护一防护”协同防控原理与技术[J].煤炭学报,2021,46(1):132-144.
- [8] Gidley J L, Holditch S A, Nierode D E, et al. Recent advances in hydraulic fracture[J]. Society Petroleum Engineering Monograph, 1989: 452-456.
- [9] 黄荣搏.水力压裂裂缝的起裂和扩展[J].石油勘探与开发,1981(5):62-74.
- [10] 余雄鹰,邢纪国,汪先迎.斜井的破裂压力和裂缝方位[J].江汉石油学院学报,1994,16(3):57-60.
- [11] 张广清,殷有泉,陈勉,等.射孔对地层破裂压力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):41-44.
- [12] C.E.Austin, R.E.Rose, SchuhF.J. Simultaneous multiple entry hydraulic fracture treatment of horizontal drilled well[J]. SPE, 18263: 811-825.
- [13] И.М.别秋克著.王秉权,王英敏译.瓦斯抽放[M].沈阳:东北工学院出版社,1956.
- [14] Bjerrum L, Andersen K H. In-situ measurement of later pressures in clay [C]//Proceeding of 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Madrid: 1972. 333-342.
- [15] Fukushima S. Hydraulic fracturing criterion in core of fill dams [R]. Report of Fujita Kogyo Technical Institute, 1986, 22: 131-136.
- [16] 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.
- [17] 吴拥政,康红普.煤柱留巷定向水力压裂卸压机理及试验[J].煤炭学报,2017,42(5):1130-1137.
- [18] 杨航宇,杜敬国.压裂工艺技术现状及新进展[J].兰州石化职业技术学院学报,2017(2):1-4.
- [19] 黄力,陶祖文,李海昆.致密砂岩气藏压裂工艺技术新进展[J].石油化工应用,2017,36(1):11-14.
- [20] 付玉坤,喻成刚,尹强,等.国内外页岩气水平井分段压裂工具发展现状与趋势[J].石油钻探工艺,2017,39(4):514-520.
- [21] 李国富,孟召平,张遂安.大功率充电电位法煤层气井压裂裂缝监测技术[J].煤炭科学技术,2006,34(12):53-55.
- [22] 李玉魁,张遂安.井温测井监测技术在煤层压裂裂缝监测中的应用[J].中国煤层气,2005,2(2):14-16.
- [23] 单大为,刘继生,吕秀梅,等.测试技术在水力压裂设计及压裂效果评价中的应用[J].测井技术,2006,30(4):357-360.
- [24] 朱权洁,肖术,王博,等.煤层水力压裂过程中的微震活动规律及其时频特征[J].煤炭科学技术,2018,(7):33-46.
- [25] 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.
- [26] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
- [27] 窦林名,李振雷,张敏.煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):41-46.
- [28] 谭云亮,郭伟耀,辛恒奇,等.煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J].煤炭学报,2019,44(1):160-172.
- [29] 潘俊锋,齐庆新,刘少虹,等.我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J].煤炭学报,2020,45(5):111-121.