

Engineering Application of Hydraulic Fracturing Technology under Hard Roof Condition

Bin Wang^{1,2,3} Jun Liu⁴ Yong Liu^{1,2,3} Yongqiang Liu^{1,2,3} Mingxuan Li^{1,2,3}

1. Tiandi (Yulin) Mining Engineering Technology Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China
2. China Coal Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100013, China
3. Tiandi Technology Co., Ltd., Beijing, 100013, China
4. Shaanxi Xunyi Qinggangping Mining Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi, 710000, China

Abstract

In view of the problem of the hard and thick roof of coal seam in Shaanxi and Mongolia, the technology of hydraulic fracturing and roof cutting is developed by combining theoretical analysis, numerical calculation and engineering application. The study shows that the stress of the cutting hole inclination and the section fracturing point determine whether the roof can collapse. Through numerical calculation and analysis, the spacing of the fracturing points is 3m and the inclination of the cutting hole is 45°. In addition, the field test was carried out, and a good lane retention effect was achieved. This technology reduces the possibility of "hurricane" disaster in the working face and reduces the cost of roadway excavation, and provides reference for similar roadway to solve similar problems.

Keywords

hard roof; hydraulic fracturing; numerical calculation; along the empty lane

水力分段压裂切顶留巷技术在坚硬顶板条件下的工程应用

王滨^{1,2,3} 刘军⁴ 刘勇^{1,2,3} 刘永强^{1,2,3} 李明轩^{1,2,3}

1. 天地（榆林）开采工程技术有限公司，中国·陕西 榆林 719000
2. 中煤科工开采研究院有限公司，中国·北京 100013
3. 天地科技股份有限公司，中国·北京 100013
4. 陕西旬邑青岗坪矿业有限公司，中国·陕西 咸阳 710000

摘要

针对陕蒙地区煤层坚硬厚顶板难垮落问题，通过采用理论分析、数值计算、工程应用相结合的方法开发出水力分段压裂切顶留巷技术。研究表明，切顶钻孔倾角及分段压裂点受的应力决定着顶板能否垮落。以此进行数值计算分析最终确定分段压裂点间距3m，切顶钻孔倾角45°。此外，进行现场试验，取得了较好的留巷效果。该技术降低了工作面老顶“飓风”灾害可能性的同时降低了掘巷成本，为类似巷道解决相似问题提供参考。

关键词

坚硬顶板；水力压裂；数值计算；沿空留巷

1 引言

在中国煤层赋存特征类型中，坚硬难垮顶板煤层占 1/3 左右^[1-3] 该类顶板的特点是：岩层厚度大、整体性强，且岩石强度高、自承能力强^[4]。厚硬顶板煤层在开采后很难垮落，尤其是在初采期间，易形成大面积悬顶，一旦垮落将形成飓风，有强烈的动力显现，也是影响冲击矿压发生的主要因素之一^[5]。

水力压裂起初被广泛应用于油气开采，通过水力压裂在储层中制造水力裂缝网，以提高油气抽采效率，是一项安全、绿色的煤岩体弱化技术。

在中国和其他国家专家对水力压裂切顶卸压积极研究实践中，获取了大量宝贵的经验，并且成功在煤层顶板中试验，取得较好的效果。其中康红普基于压裂孔边缘应力场的变化，建立了水压力对裂缝萌生和发展的力学模型，阐述了其作用机理，并通过大量的现场试验验证，同时不断优化工艺，在全国各煤矿取得较好的试验结果。蔡燕伟通过对比传统爆破切顶与水力压裂切顶技术，得出水力压裂切顶技术能够更加安全有效控制顶板垮落。庞凤岭通过研究提出厚煤层破碎煤体水力短孔压裂切顶卸压技术，进一步证明了水力压

【作者简介】王滨（1987-），男，中国山东东平人，硕士，高级工程师，从事矿山压力及其岩层控制与水力压裂研究。

裂的适应性。

综上所述,水力压裂切顶技术在煤矿中应用较广,技术较为成熟。但对于厚硬顶板,若未掌握弱化顶板的关键因素,水力压裂后仍难以垮落,带来一定危险。为此论文针对陕蒙地区浅埋煤层坚硬厚顶板开发出井下水力分段压裂切顶技术,设计水力压裂方案,保证压裂效果,为厚大坚硬顶板切顶留巷提供经验。

2 工程概况

金鸡滩煤矿 111 工作面所在含煤地层为侏罗系中统延安组,本工作面煤层为 5² 煤层,可采煤厚 5.12~5.92m,平均 5.24m,地质构造简单。该工作面东邻 110 工作面(回采完毕),西邻 112 工作面(未回采),北部为保护煤柱。根据相邻工作面经验,该工作面顶板为坚硬厚砂岩,初次及周期来压步距长,来压强度大,增大了留巷难度。

3 坚硬顶板弱化受力分析

煤层坚硬顶板有三大特点,为硬、厚、实,为分析其受力,可将坚硬顶板视为两端固支“梁”结构分析模型,如图 1 所示。

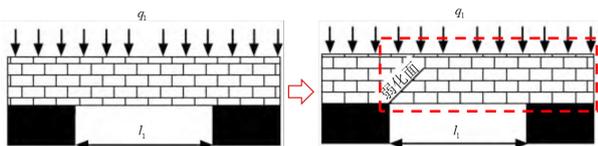


图 1 固支“梁”结构分析模型

在顶板完成弱化后,如图 2 所示,可将其视为“楔形”岩层体,将“楔形”岩层体单独取出简化为物理模型。

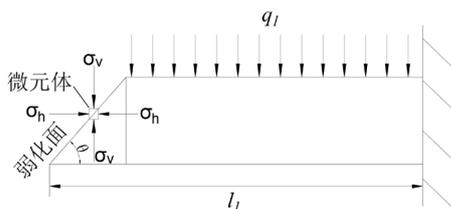


图 2 “楔形”岩层体物理模型

在弱化面位置岩体中以弱化面线为对角线取微元体,软弱面处微元体正应力 σ 和切应力 τ 为:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v) - \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v) \cos 2\theta \\ \tau &= -\frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v) \sin 2\theta \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: σ_h ——微元体受到的水平应力, m;

σ_v ——微元体受到的垂直应力, m;

θ ——软弱面倾角, °。

如式(1)可知,软弱面的倾角以及微元体受到的水平、垂直应力决定着软弱面正切应力的变化,也是导致顶板垮落的重要因素。而在实际工程中,软弱面倾角代表着水力压裂钻孔倾角;微元体所承受的正切应力代表着水力压裂分段点

承受的正切应力,分段点数量也决定着软弱面总体应力大小。为取得陕蒙地区金鸡滩煤矿 111 工作面合理水力分段压裂切顶参数,即分段点数量和钻孔倾角,采用数值模拟进一步研究。

4 水力压裂切顶参数优化模拟

4.1 模型建立

为取得陕蒙地区金鸡滩煤矿 111 工作面合理水力压裂切顶参数。基于现场工程地质条件,以 111 工作面为模拟对象,采用 FLAC3D 软件建立长 423m,宽 100m,高 100m 计算模型。本模型共计 321903 个实体单元,56820 个结构单元。同时标定水力压裂所产生的软弱面,对模型顶部施加原岩自重应力,底部进行全约束,其余四面只施加水平方向约束。

4.2 水力压裂切顶参数模拟分析

由上述可知,分段点数量和钻孔倾角决定着顶板能否垮落。如图 3 所示,因分段点数量越多,间距越小,为更加直观表现出模拟效果,采用分段间距表示分段点数进行分析。又通过总结以往陕蒙地区分段压裂点间距和钻孔倾角,现设计模拟分段压裂点间距 2m、3m、4m 为方案一、方案二、方案三,模拟水力压裂钻孔倾角 35°、45°、55° 为方案四、方案五、方案六。最后对比模拟结果得出 111 工作面最适合的切顶工艺参数。

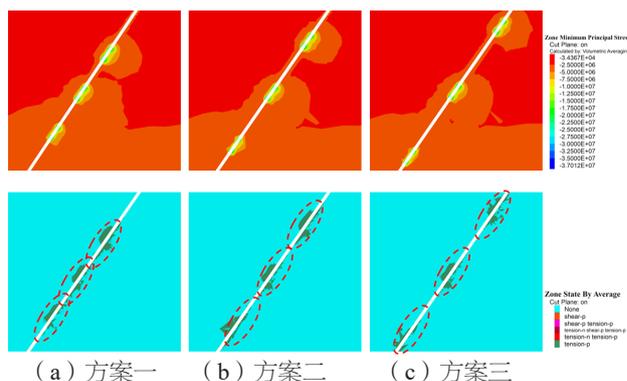


图 3 不同分段压裂点间距应力及塑性区分布

4.2.1 不同分段压裂点间距确定

改变水力分段压裂点间距,对压裂点分别施加 10MPa 正切应力,得到钻孔最大主应力和塑性区分布如图 3 所示。

随着水力分段压裂点间距的增加,工作面顶板的最大主应力基本相同,孔壁所承受的应力主要在 17.5~22.5MPa 之间,应力集中不明显,这表明应力施加范围较为准确。再观察图中塑性区发布可知,当水力分段压裂点间距为 2m 时,3 个分段点之间拉伸破坏区重合,并且随着间距的增大重合区逐渐变小,直至间距为 4m 时,塑性区范围完全分开,这表明分段压裂点间距会对水力压裂弱化面产生影响,并且随着间距的增大,弱化效果逐渐减弱。对于工程而言,减少分段压裂点间距可以增加水力压裂效果。但是,压裂和软化过

度会导致工作面顶板维护困难,且随着分段间距的减少还会进一步增加施工经济成本,提高施工难度。因此,综合考虑选取水力分段压裂间距,即分段点数量,要根据工作面上覆岩层实际情况,若分段点数量较少,达不到弱化顶板效果,若分段点数量较多,则增大施工成本,且施工困难。

4.2.2 不同钻孔倾角确定

分段压裂点间距与钻孔倾角会对水力压裂弱化面产生影响。其中,随着分段压裂点间距的增大,弱化效果逐渐减弱。随着钻孔倾角的增大,巷道非工作帮应力集中显现情况逐渐减少。同时考虑工程施工难度及成本,最终确定陕蒙地区金鸡滩煤矿111工作面水力分段压裂切顶合理参数为分段压裂间距3m,水力压裂钻孔倾角45°。

5 工程应用

5.1 水力压裂钻孔布置及施工

根据施工地点的钻孔柱状图以及井下现场钻孔施工时顶板不同层位岩性情况的综合分析,得出水力分段压裂切顶技术方案中钻孔布置参数如下:采用后退式单孔多次压裂,距工作面侧帮1.2m处顶板布置钻孔,钻孔偏向工作面侧,与煤层水平仰角为45°,长度35m,水平偏转角20°,直径 $\phi 56\text{mm}$,水平投影长度20m,垂直投影长度35m,钻孔间距10m。水力压裂长度23m,分段压裂点间距为3m,压裂次数可根据窥视图和岩层强度进行调整。单孔压裂时间20~30min,单孔压裂压力10~20MPa。

具体施工顺序:窥视仪观察顶板岩层结构→确定压裂参数→施工压裂钻孔→实施压裂→观测压裂效果。

5.2 切顶留巷施工方案

采用“支卸组合—泵充混凝土支柱”切顶留巷技术。

总体技术思路为:超前分段水力压裂卸压+高预应力、强力锚杆与锚索巷内补强支护+单元支架及时支护+强力支柱巷旁支护+采空区高韧性喷浆材料密闭隔绝+在线矿压实时监测。采用水力压裂对顶板进行超前卸压,诱导采空区端头悬臂沿切顶线滑落,减小悬臂梁长度,增加直接顶垮落高度,形成“短悬臂梁”结构,减小巷旁支护压力。巷旁浇注 $\Phi 1200\text{mm}$ 支柱,中心间距1700mm,留巷顶板补打锚索。

5.3 效果监测

为了检验水力压裂切顶留巷效果,在111运输巷道选取2个断面,采用十字布点法监测巷道表面位移,其中1#监测点选择超前工作面10m处,监测频率为1~2次/周;2#监测点选择超前工作面20m处,监测频率1次/天。在巷道监测断面顶底板中部垂直方向和两帮中部水平方向钻孔安装木桩并嵌入测钉,观测方法为:在C、D之间拉紧测绳,A、B之间拉紧钢卷尺,测读顶板下沉量(AO)、底鼓量(AB);在A、B之间拉紧测绳,C、D之间拉紧钢卷尺,测读左帮移近量(CO)、左帮移近量(CD)。测量精度要求达到1mm。同时每监测一次记录监测点与工作面的距离。

根据记录好的监测数据,绘制巷道变形曲线,可知1#监测点巷道主要以底鼓和右帮变形为主,并随着工作面推进,变形量由逐渐增大到趋于平缓。直至工作面推过监测点420m时,巷道右帮移近量最终达到429mm,底鼓量最终达到365mm;顶板下沉量和右帮变形量相对较小,最大仅111mm和218mm。2#监测点巷道主要以底鼓变形为主,并随着工作面推进,变形量逐渐增大并仍有增大的趋势。直至工作面推过监测点98m时,巷道底鼓量最终达到210mm;顶板下沉量和两帮变形量相对较小,其中顶板下沉量最大仅121mm;两帮移近量最大仅42mm和61mm。

综上所述,为对比切顶留巷形成后短期与长期内围岩变化情况,采取不同频率监测两组断面,可知在切顶巷道形成短期内,最先发生且变形较大的为底鼓,并随着工作面的推移最终保持较大的移动范围。其次还可知,巷道压裂后顶板下沉量明显较小,这表明“支卸组合—泵充混凝土支柱”切顶留巷技术的适用性与可靠性。从总体角度看,水力压裂切顶技术有效地解决了111工作面坚硬顶板难垮落问题,同时也控制了111运输巷道围岩大变形现象。

6 结论

①针对金鸡滩煤矿111工作面煤层坚硬厚顶板难垮落问题,通过水力分段压裂技术弱化顶板卸压,杜绝了因坚硬顶板悬顶而造成的大面积一次垮落现象的发生,极大降低了工作面老顶“飓风”灾害的可能性。

②通过物理模型计算表明,软弱面的倾角以及微元体受到的水平、垂直应力决定着顶板是否能够正常垮落。

③通过数值模拟可知,随着分段压裂点间距的增大,弱化效果逐渐减弱。随着钻孔倾角的增大,巷道非工作帮应力集中显现情况逐渐减少。同时考虑工程施工难度及成本,最终确定111工作面水力分段压裂切顶合理参数为分段压裂点间距为3m,水力压裂钻孔倾角为45°。

④提供过现场试验证明,留巷顶板下沉量较小,最大仅111mm,变形量最大的右帮移近量最终达到429mm。从总体角度看,水力压裂切顶技术有效地解决了111工作面坚硬顶板难垮落问题,同时也控制了111运输巷道围岩大变形的矿压现象。

参考文献

- [1] 王春林,郑凯歌,王豪杰,等.坚硬顶板首采工作面初采阶段水力压裂综合治理技术研究[J].煤炭工程,2023,55(5):63-69.
- [2] 冯彦军,康红普.水力压裂起裂与扩展分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3169-3179.
- [3] 康晓峰.特厚坚硬煤层深浅交替钻孔水力压裂弱化顶煤技术研究[J].煤炭工程,2023,55(3):19-24.
- [4] 李柱和,王利波,张志刚,等.大采高工作面切顶卸压沿空掘巷的研究与应用[J].煤炭技术,2022,41(8):40-45.
- [5] 窦林名,刘贞堂,曹胜根,等.坚硬顶板对冲冲击矿压危险的影响分析[J].煤矿开采,2003(2):58-60+66.