

高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用

林柏泉¹, 吕有^{1,2}, 李宝玉¹, 翟 成¹

(1. 中国矿业大学 能源与安全工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 平顶山煤业集团公司 十二矿, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 分析了煤层巷道煤与瓦斯突出机理, 提出了整体卸压理念, 开发了高压磨料射流割缝防突技术并且在煤层巷道掘进工作面进行了实际应用。应用结果表明: 该技术可用于具有突出或冲击危险的煤层, 可以使钻孔之间相互沟通, 造出缝隙, 使煤体得到充分卸压、煤体中的瓦斯得到排放和应力得到解除, 为掘进工作提供较为安全的工作环境。

关键词: 水力割缝技术; 掘进; 防突措施

中图分类号: TD421.59

文献标识码: A

High-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology and its application in outbursts prevention

LIN Bai-quan¹, LÜ You-chang^{1,2}, LI Bao-yu¹, ZHAI Cheng¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. The Twelfth Coal, Pingdingshan Coal Mining Group, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: The mechanism of the high-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology was analyzed and the theory of the whole stress-relaxation was expatiated. The technology of the high-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology was developed and applied in head-cutting. The results show that the technology can broaden and connect with the crannies which can eject out the methane and eliminate methane pressure.

Key words: high-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology; head-cutting; outbursts prevention measure

中国是世界上煤与瓦斯突出(以下简称突出)最为严重的国家之一,至2005年,中国已有20个省(区)的一些矿井发生了突出,仅国有重点煤矿就有突出矿井250多对,共发生突出30 000多次,仅强度超过千吨的特大型突出就有100多次^[1]。根据对发生突出的作业地点统计,突出多数发生在煤巷掘进工作面,占有突出次数的66.2%,煤巷掘进过程中频繁的突出成为危及职工生命安全的主要原因;同时,掘进防突措施工序复杂,掘进速度缓慢,造成采掘比例严重失调。为了有效防治掘进期间掘进工作面的瓦斯突出,国内外煤炭科研人员进行了较为广泛的研究,先后试验了多项防突技术措施,并取得了一定的防突效果。目前,本煤层掘进工作面可供采取的主要防突技术措施有:超前钻孔、深孔注水、水力冲孔、深孔松动爆破和深孔控制爆破等^[2]。这些防突技术措施普遍存在着整体卸压不够充分,容易出现措施后效检指标超限、施工工序复杂等现象。

收稿日期: 2006-10-17 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574093, 50534090); 国家重点基础研究发展计划(2005cb221506)和“十五”国家科技攻关重点资助项目(2005ba813b07)

作者简介: 林柏泉(1960-),男,福建龙岩人,教授,工学博士,博士生导师。E-mail: lbq21405@126.com

为了有效治理高突煤层掘进巷道瓦斯突出问题,提高执行防突措施的有效性和矿井生产的安全性,笔者对高突矿区煤层巷道掘进过程中的防突技术进行了研究,并且以平煤集团十二矿作为示范点,以期解决目前中国高突矿区煤层巷道掘进过程中存在的主要问题。

1 煤层巷道煤与瓦斯突出机理

煤与瓦斯突出的发生必须具备一定的能量。为了达到一定的能量水平,突出的煤体经历着能量的积聚过程,并且使之逐渐发展到临界破坏甚至过载的脆弱平衡状态。

突出的发展过程一般可划分为 4 个阶段^[3]:

(1) 准备阶段. 该阶段的特点是在工作面附近的煤壁内形成高的地应力与瓦斯压力梯度,即在有利的约束条件下,煤内地应力梯度急剧增高,形成很高的应力集中,积聚很大的变形能;同时由于孔隙裂隙的压缩,使瓦斯压力增高,瓦斯内能增大。在这个阶段,会显现多种有声的与无声的突出预兆。

(2) 激发阶段. 该阶段的特点是地应力状态突然改变,即极限应力状态的部分煤体突然破坏,卸载(卸压)并发生巨响和冲击;向巷道方向作用的瓦斯压力的推力由于煤体的破裂,顿时增加几倍到十几倍,伴随着裂隙的生成与扩张,膨胀瓦斯流开始形成,大量吸附瓦斯进入解吸过程而参与突出。根据平煤集团十二矿的突出实例表明,应力状态变化越剧烈,越容易引起突出,而震动放炮、一般爆破是最容易引发应力状态剧烈变化的工序,在平煤集团十二矿所发生的突出中,放炮引起突出的占 50% 以上。

(3) 发展阶段. 该阶段具有 2 个互相关联的特点,① 突出从激发点起向内部连续剥离并破碎煤体;② 破碎的煤在不断膨胀的承压瓦斯风暴中边运送边粉碎。前者是在地应力与瓦斯压力共同作用下完成的,后者主要是瓦斯内能做功的过程。煤的粉化程度、游离瓦斯含量、瓦斯放散初速度、解吸的瓦斯量以及突出孔周围的卸压瓦斯流,对瓦斯风暴的形成与发展起着决定作用。在该阶段中煤的剥离与破碎不仅具有脉冲的特征,而且有时是多轮回的过程。

(4) 终止阶段. 突出的终止有 2 种情况:① 在剥离和破碎煤体的扩展中遇到了较硬的煤体或地应力与瓦斯压力降低到不足以破坏煤体;② 突出孔道被堵塞,其孔壁由突出物支撑建立起新的拱平衡或孔洞瓦斯压力因其被堵塞而升高,地应力与瓦斯压力梯度不足以剥离和破碎煤体。但是,这时突出虽然停止了,但突出孔周围的卸压区与突出的煤涌出瓦斯的过程并没有停止,异常的瓦斯涌出还要持续相当长的时间。

根据现场实践表明,当煤巷卸压区中的煤体受到破坏时,则往往导致突出的发生。因此,在煤巷中,煤与瓦斯突出的条件^[4-6]为

$$H\sigma_y + p - M(e^{BX_0} - 1) \geq \sigma_T, \quad (1)$$

式中, $H = \sigma_T / \sigma_0$, σ_0 为单轴抗压强度; σ_y 为地应力; p 为瓦斯压力; $M = CA_0 \cot \varphi$, C 为煤层或软分层的黏结力, A_0 为侧压系数, φ 为煤体内摩擦角; $B = 2 \tan \varphi / mA_0$, m 为煤层厚度; X_0 为卸压区长度; σ_T 为抗拉强度。

式(1)表明:煤与瓦斯突出不仅取决于地应力、瓦斯压力和煤体强度,同时还和卸压区的长短有关。当卸压区长度一定时,地应力、瓦斯压力越大,则突出的危险性就越大;反之,当地应力、瓦斯压力一定时,卸压区长度越小,则越容易满足上式,突出危险性就越大,而在另一些地方则不会发生突出,其原因就在于和该处煤体卸压区的长短有关。而现行的许多防突措施如深孔松动爆破、钻孔瓦斯排放等,能实现防突的主要原因就在于通过采取措施后,加大了卸压区的范围,使式(1)不能被满足,从而达到防止煤与瓦斯突出的目的。

因此,煤与瓦斯突出和工作面前方卸压区的大小直接关系,卸压区的大小决定了煤体中储存的弹性潜能和瓦斯内能是否能够释放,突出是否能够形成。一般情况下,卸压区越薄,则集中应力区最大值越接近工作面,瓦斯压力梯度越大,卸压区被冲破而形成突出的可能性就越大;煤与瓦斯突出预测所要做的的工作,实际上就是采用一定的手段检测工作面前方一定范围内是否存在高压瓦斯和应力集中,卸压区的范围是否足以阻止突出的发生;当卸压区的范围足够大时,即使工作面前方存在高压瓦斯和急剧的应力集中,

突出也不可能形成;反之,卸压区范围越小,则保护屏障就越薄,突出就越容易形成.这就是本项目的理论基础,即以扩大卸压区的范围来实现防突目的.

2 高压磨料射流割缝防突基本原理

由以上分析可知,只有使工作面前方煤体得到充分卸压和排放瓦斯,才能消除突出危险性,确保工作面的安全生产,高压磨料射流割缝技术正是为实现这一目的,而采取的一项技术手段.高压磨料射流割缝的基本原理:通过一定的技术手段,将具有一定粒度的磨料粒子加入到高压水管路系统中,使磨料粒子与高压水进行充分混合后再经喷嘴喷出,从而形成具有极高速度的磨料粒子流——磨料射流^[7].在钻孔内利用磨料射流对钻孔两侧的煤体进行切割,在钻孔两侧形成一条具有一定深度的扁平缝槽,利用水流将切割下来的煤体带出孔外.割缝后,增加了煤体暴露面积,且扁平缝槽相当于局部范围内开采了一层极薄的保护层,所以使得钻孔附近煤体得到了局部卸压,改善了瓦斯流动条件.

简而言之,高压磨料射流割缝机理是在水射流和地应力及瓦斯的共同作用下,使煤体破裂,在煤层的饱满瓦斯地区,水射流激发地应力和瓦斯压力破坏煤体,而大量的瓦斯除了破坏煤体以外,还把破坏的煤从孔内排出^[8].

在实际应用过程中,首先根据工作面的大小确定在工作面前方打几个钻孔,再利用高压磨料射流割缝技术使钻孔之间相互沟通,造出缝隙,形成“从点到线、从线到面、从面构成立体”的卸压过程,使煤体得到充分卸压、煤体中的瓦斯得到排放,为掘进工作提供较为安全的工作环境,其高压磨料射流割缝钻孔布置方式如图1所示.

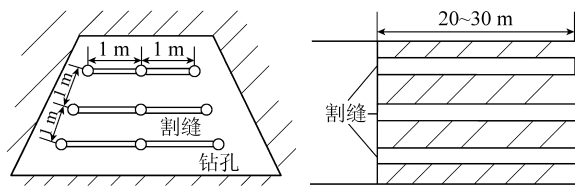


图1 割缝钻孔布置

Fig. 1 The drain hole distribution

3 高压磨料射流割缝技术及设备

高压磨料射流切割技术是以高压水为介质,通过磨料发生装置使磨料获得能量,磨料与水的混合浆体从喷嘴喷射出来,形成能量高度集中的一股磨料水射流,磨料粒子本身有一定的质量和硬度,因此磨料水射流具有良好的磨削、穿透、冲蚀的能力.

如图2所示,从高压泵出来的高压水分成3路:第1路高压水到达磨料发生器的顶部,迫使磨料往下运动;第2路高压水经过单向阀到达磨料发生器底部的混合腔,依靠水的流动将磨料罐中流下来的磨料携带走;第3路高压水称为旁通水路,高压泵出来的高压水经过旁通水路直接送到磨料罐的下游,引射出混合腔里磨料浆,第2,3路的流体混合均匀后,从磨料喷嘴流出.

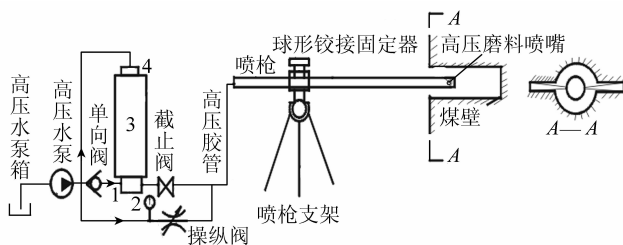


图2 高压磨料射流割缝装置系统

Fig. 2 High-pressure abrasive hydraulic cutting seam equipment

1——磨料混合腔;2——压力表;3——高压磨料发生装置;4——加磨料入口

高压磨料割缝设备主要是由高压泵站、高压磨料发生装置、高压磨料喷枪组件、液压控制系统等组成.

4 工业性试验及应用

4.1 试验目的

① 检测所研制设备在煤层巷道掘进工作面的适应性及切割性能;② 检测采用纯水射流和高压磨料射

流割缝深度和高度;③检测割缝期间巷道内瓦斯浓度变化情况、钻孔内煤体坍塌情况等。

4.2 工作面概况

工业性试验地点在平煤集团十二矿己 15-17180 煤层巷道掘进工作面,该工作面走向长度 1 020 m,可采走向长 770 m,斜采长 246 m,煤层赋存较稳定,平均厚度 3.4 m,采高 3.2 m,可采储量 79 万 t。煤层节理较发育,煤层瓦斯压力 1.77 MPa,煤层瓦斯含量 13.15 m³/t,瓦斯储量 1 039 万 m³。采煤工作面标高 -370 ~ -490 m,平均 -430 m,对应地面标高 150 ~ 250 m。平均垂深 580 m。煤层倾向 15°,倾角 22 ~ 45°,煤层产状走向 105°,煤的容重为 1.33;煤的坚固性系数 $f=1.0 \sim 1.5$;煤的破坏类型为 II ~ III。直接顶板为深灰色砂质泥岩,厚度 7 ~ 12 m,无伪顶。底板为灰色砂质泥岩,内含植物化石碎片,厚度为 3 ~ 10 m。

该工作面地质构造比较简单,没有大的断层分布,仅有 2 条小断层,第 1 条在变陡带内,第 2 条在薄煤带内,对该面突出危险性有一定的影响。煤层顶、底板均为透气性差的砂质泥岩,不利于瓦斯释放。

4.3 试验过程

(1) 钻孔布置。在迎头工作面已有 10 个直径为 89 mm、深度为 60 m 的抽放钻孔,选择其中的 2 个钻孔进行了割缝试验,这 2 个钻孔布置在软分层中,见表 1。

(2) 高压纯水射流割缝实验。本次试验采用单喷嘴喷枪,喷嘴直径 2.1 mm,水压控制在 30 MPa 以内,水流量为 1.5 m³/h,单边割缝深度 690 mm,割缝高度 30 mm 左右。喷枪伸到孔内 9 m 处,高压水泵开始加压,喷枪割缝时从孔底向孔外进行,割缝速度大约为 0.5 m/min。

(3) 高压磨料射流割缝实验。本次试验采用单喷嘴磨料射流,喷嘴直径 2.1 mm,水压控制在 30 MPa 以内,水流量为 1.5 m³/h,磨料供给量为 4 kg/min,单边割缝深度 750 mm,割缝高度 35 mm 左右。喷枪伸到孔内 9 m 处,高压水泵开始加压,喷枪割缝时从孔底向孔外进行,割缝速度大约为 0.7 m/min。

(4) 割缝过程的现象。大量煤粉从孔内排出,大约有 0.3 t 煤涌出,没有出现塌孔现象。割完第 1 个孔后再割第 2 个孔时,发现大量水从第 1 个孔内流出,这说明两个钻孔已经割通。

(5) 割缝过程瓦斯浓度的变化。在割缝过程中巷道瓦斯浓度最大为 0.89%,比没有割缝时的瓦斯浓度增加了 3 倍;稳定后的瓦斯排放也比没有割缝时的瓦斯浓度增加了近 2 倍,如图 3 所示。煤层巷道掘进工作面的突出危险性得到显著改善,如图 4 所示。

(6) 割缝能力及用水情况。现场割缝试验表明,高压磨料射流割缝能力可比纯水射流割缝提高 50%,用水量降低 20% ~ 30%,由于割缝所用水量较小,没有出现迎头积水现象。

4.4 试验结果分析

(1) 高压水射流割缝措施使原排放孔的宽度增加 12 倍左右,大大增加瓦斯排放效果。在割缝过程中瓦斯浓度只增加 1 倍的原因是在割缝之前,在其它孔已经进行了负压抽放数日。

(2) 割缝过程中水射流破坏煤体的单位能耗与煤层中所含瓦斯量成反比。17180 机巷工作面单喷嘴喷枪割缝深度 690 mm,与 17150 巷道两帮单喷嘴割缝深度 350 mm 相比,可以看出同样的水压、水量及煤质割缝深度却相差近 1 倍。

(3) 高压磨料射流割缝机理是在水射流和地应力及瓦斯的共同作用下使煤体破裂,在煤层的饱含瓦斯

表 1 己₁₅-17180 巷道割缝参数

Table 1 Parameters of cutting seam in laneway Ji₁₅-17180

孔号	喷枪形式	割缝介质	割缝深度/mm	割缝高度/mm	水压/MPa
1	单喷嘴	纯水射流	690	30	30
2	单喷嘴	磨料射流	750	35	30

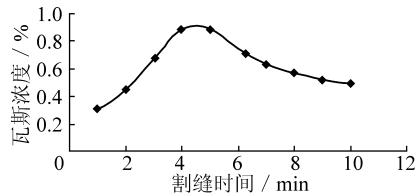


图 3 割缝过程中巷道瓦斯浓度变化曲线

Fig. 3 The curve of methane content during the cutting seam

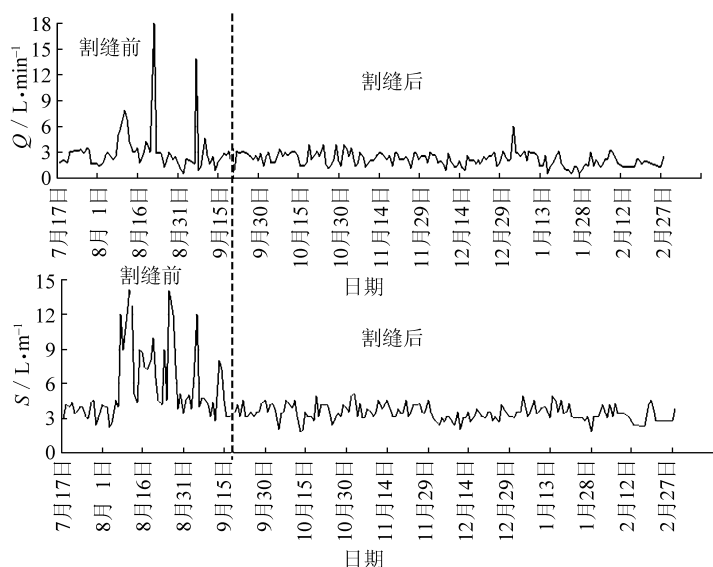


图4 割缝前、后巷道瓦斯浓度的变化曲线

Fig. 4 The curve of methane content before and after the cutting seam

地区, 水射流激发地应力和瓦斯压力破坏煤体, 大量瓦斯除了破坏煤体以外, 还把破坏的煤从孔内排出。

5 结 论

(1) 煤与瓦斯突出的发生必须具备一定的能量, 为了达到一定的能量水平, 突出的煤体经历着能量的积聚过程, 使之逐渐发展到临界破坏甚至过载的脆弱平衡状态。突出的发展过程一般可划分为4个阶段, 即: 准备阶段、激发阶段、发展阶段和停止阶段。突出预测所要做的工作是, 在突出的准备阶段及时测出有关参数, 并进行预报, 为是否采取防突措施提供依据。

(2) 高压磨料射流割缝技术具有割缝能力强、用水量相对较少并且工艺简单、操作方便的特点, 可用于高瓦斯高应力煤层巷道掘进工作面的快速卸压、增透和排瓦斯工作。

(3) 通过有效的割缝, 能够快速释放煤体中的瓦斯和地应力, 掘进巷道安全状况得到明显改善, 且割缝深度达到 20.75 m 左右, 可以减少用于消突的瓦斯排放钻孔个数, 提高劳动效率, 降低劳动强度, 具有明显地经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [2] 于不凡. 煤和瓦斯的突出机理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
- [3] 林柏泉, 崔恒信. 矿井瓦斯防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [4] 林柏泉. 深孔控制卸压爆破及其防突作用机理的实验研究 [J]. 阜新矿业学院学报, 1995, 14 (3): 16 ~ 21.
- [5] 姚宇平, 周世宁. 含瓦斯煤的力学性质 [J]. 中国矿业大学学报, 1988, 17 (1): 1 ~ 4.
- [6] 齐黎明, 林柏泉, 支晓伟. 上山掘进时卸压区应力及防突长度分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34 (3): 299 ~ 302.
- [7] Knaupp M. 高压水喷射切割新技术 [J]. 国外金属加工, 1995 (4): 30 ~ 32.
- [8] 韦 颖. 几种磨料水射流系统及其应用效果 [J]. 江苏煤炭, 1998 (3): 23 ~ 25.