

高压空气爆破煤层致裂增透工艺研究

汪开旺^{1,2}

(1. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 2. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要:为解决高压空气爆破技术在实施过程中爆破参数不准确、操作程序不规范的问题,采用理论与现场试验相结合的研究方法,对高压空气爆破致裂增透工艺进行了研究,得出了以钻孔孔径、爆破压力、爆破孔间距和爆破冲击次数为主的高压空气爆破参数,制定了选址、钻孔施工、系统组装、爆破筒置入、封孔、起爆等 6 步高压空气爆破致裂增透工艺,实现了爆破增透工艺的流程化、完整化和标准化。煤层高压空气爆破致裂增透工艺现场验证结果表明:高压空气爆破致裂增透工艺能够适用于井下操作,爆破压力选择 50 MPa、爆破孔与抽采孔孔径选择 94 mm、单孔爆破次数 2~3 次时,致裂效果明显,大幅增强了煤层的透气性,提高了煤层瓦斯的涌出量与抽采量,改善了煤层瓦斯抽采效果。

关键词:高压空气爆破;煤层增透;增透工艺;瓦斯抽采;爆破参数

中图分类号:TD235.38

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)02-0193-05

Study on technology of fracturing and permeability improved of coal seam with high pressure air blasting

WANG Kaiwang^{1,2}

(1. Shenyang Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Fushun 113122, China;

2. National Key Lab of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: In order to solve the inaccurate blasting parameters and abnormal operation procedure problems occurred in the implementation process of the high pressure air blasting technology, a theoretical study and a site experiment combined study method were applied to study the fracturing and permeability improved technology with the high pressure air blasting. The high pressure air blasting parameters mainly with the borehole diameter, blasting pressure, space between the blasting boreholes and blasting impact times were obtained. The fracturing and permeability improved technology was set up, including the six steps of the location selection, drilling operation, system assembly, blasting cartridge placement, borehole sealing and detonation. The processing, integration and standard of the blasting and permeability improved technology were realized. The site experiment results of the seam high pressure air blasting fracturing and permeability improved technology showed that the fracturing and permeability improved technology with the high pressure air blasting could be suitably applied to the underground mine operation, the blasting pressure could be selected as 50 MPa, the diameter of the blasting borehole and the gas drainage borehole could be selected as 94 mm and the blasting times per single borehole was 2~3 times. The fracturing effect was obvious, the permeability of the seam was highly enhanced, the gas emission volume and gas drainage volume of the seam were improved and the seam gas drainage effect was improved.

Key words: high pressure air blasting; seam permeability improved; permeability improved technology; gas drainage; blasting parameter

0 引言

瓦斯抽采不仅是防治煤矿瓦斯事故的有效措

施,而且是煤层瓦斯开发利用的关键技术^[1]。我国煤层赋存条件差、瓦斯含量高、煤层的透气性差,严重影响了瓦斯抽采。为了提高煤层透气性,学者们

收稿日期:2017-08-11;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.02.027

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045-004-004)

作者简介:汪开旺(1985—),男,湖北荆门人,助理研究员,硕士。E-mail:wangwangthxq@163.com

引用格式:汪开旺.高压空气爆破煤层致裂增透工艺研究[J].煤炭科学技术,2018,46(2):193-197.

WANG Kaiwang. Study on fracturing and permeability improved technology with high pressure air blasting[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 193-197.

研发了多种技术手段,包括交叉钻孔^[2-3]、水力压裂、水力割缝^[4-7]、炸药爆破^[8-10]、液态 CO₂ 爆破^[11-13]。然而这些方法部分存在技术条件和工艺不完善的问题,还有待继续改进。

针对地质条件复杂、瓦斯灾害严重、煤岩性质特殊的煤矿,文献[14-20]提出高压空气爆破致裂技术。它以井下空气为介质气源具有低成本、无污染的特点,同时避免了使用炸药,不会产生火花,杜绝了因炸药爆破引燃瓦斯的可能。高压气体爆破破煤技术最早于1938年美国的AIRDON公司开始研究,利用8个气缸的活塞型压缩机,将空气压缩到爆破筒,通过排气阀的控制实现爆破。到20世纪五、六十年代,世界上一些采矿技术比较发达的国家已将高压气体爆破采煤设备用于采煤工作面^[20]。直到现在,国外还没有将高压空气爆破技术用于煤层增透,笔者基于高压空气爆破技术的优秀高效的爆破效果,将其引入我国进行煤层爆破增透。

从2008年开始,笔者开始从事高压空气爆破技术的引进及装备的国产化研究,研制了高压空气加压泵站,形成了爆破装备并进行了工业试验。但是,高压空气爆破致裂技术的研究基本集中在装备与基本工作原理上,具体的爆破参数、爆破工艺、爆破影响因素等方面并未得到深入研究。笔者基于前期大量基础研究,提出了高压空气爆破致裂工艺研究,对爆破技术参数的选择及各个工序进行详细介绍,为现场应用提供技术参考。

1 高压空气爆破增透技术

1.1 工作原理

高压空气爆破就是利用被压缩的高能气体突然释放激发形成的冲击波在钻孔周围一定区域产生强烈变形破坏,使煤体破碎,形成初始裂隙;然后在应力波的作用下,使煤体继续经历拉伸和剪切破坏,产生径向和环向裂隙;应力波过后高压气体产生准静态应力场,以尖劈作用,使之前形成的裂隙进一步扩展,这样在原始煤体产生新裂隙和拓展原有裂隙,在爆破孔周围形成纵横交错、相互联系的裂隙网络,使煤体应力得到重新分布,在应力降低区,煤体透气性系数得到不同程度改善的同时卸压释放出大量瓦斯。

这些裂纹增加了煤体的透气性,见式(1)^[10],有利于瓦斯的解吸,同时为瓦斯抽采提供了便利。

$$\begin{cases} \lambda = -\lambda' e^{-Ax} & 0 \leq x \leq L_0 \\ \lambda = \lambda_0 & x \geq L_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ 为距离钻孔一定距离处煤体透气性系数; x 为煤体到钻孔距离; λ' 为煤壁暴露面处的透气性系数; λ_0 为煤层原始透气性系数; A 为系数; L_0 为爆破松动圈半径。

1.2 成套装备

经过多年的研究,现已形成完整的高压空气爆破成套技术与装备。其主要由高压空气加压泵站、高压储气装置、高压空气输送管路系统、高压空气控制系统、高压空气释放装置等其他配件组成。通过工业化应用,该套装备实现稳定输出额定压力达到55 MPa,单孔瓦斯抽采效率提高40%以上。

1.3 技术特点

高压空气爆破技术以改善煤层透气性状况为目的,除了能够缩短瓦斯抽采时间、减少抽采成本,还具有如下特点:①由于其本身独特的技术特点,高压空气爆破所用介质为空气,可以重复利用,基本无耗材成本;②作为爆破所使用的空气,不会增加空气污染源,不会增加有毒气体及二氧化碳排放量;③爆破不会产生火花,杜绝了因火花引燃瓦斯的可能,同时大量高压气体膨胀会稀释因爆破增透而逸散出来的瓦斯,避免局部瓦斯超限;④使用钻杆送入爆破筒,降低工人劳动强度,可以根据需要布置爆破钻孔,不受钻孔倾角限制。

2 高压空气爆破参数

高压空气爆破致裂增透的效果取决于爆破孔孔径、爆破压力、爆破孔间距以及爆破冲击的次数。

2.1 爆破孔和抽采孔孔径

孔径的大小影响到施工效率、爆破效果。爆破筒直径为50 mm和60 mm两种,工作时其外表附着有直径为16 mm的高压胶管,因此钻孔孔径至少需要大于76 mm。孔径过小,爆破筒不易送入钻孔,且会严重磨损外置高压胶管。孔径过大,高压空气爆破所产生的冲击波在极具压缩性的空气介质中能量衰减增加,降低了对煤体的冲击破坏作用,削弱了爆破增透效果。因此爆破孔孔径应根据钻孔围岩性质、爆破筒直径、钻孔性能等因素加以综合考虑。

根据相似模拟试验以及在煤矿现场进行工业性试验时现场钻机及施工情况、实际井下爆破效果,爆破孔孔径选择为94 mm。抽采钻孔因其在爆破时兼具控制孔的作用,孔径根据打钻设备和矿井本身施工工艺情况选择,一般在75~113 mm即可。

2.2 爆破压力与孔间距

基于爆破筒结构的设计,能实现爆破压力在 100 MPa 以下可调节,不同爆破压力致裂半径亦不相同,根据机理研究得出其爆破破碎区最大半径 $r_{k,max}$ (无控制孔时)可以按式(2)^[21]确定。

$$r_{k,max} = r_b \left\{ \frac{p_b}{\frac{\sigma_s}{2} \left[1 - \left(\frac{r_n}{r_e} \right)^2 \right] } \right\}^{\frac{1}{2\gamma_1}} \quad (2)$$

式中: r_b 为空腔区半径,取 0.127 5 m; p_b 为初始爆破压力; σ_s 为煤的抗拉强度,取 0.218 MPa; r_n/r_e 为空腔区与压碎区之间的半径比值,取 0.2; γ_1 为井下空气绝热指数,取 1.0。由此可以算出不同爆破压力时的影响半径,爆破压力分别为 30、40、50、60、70、80、90、100 MPa 时,影响半径分别为 2.16、2.49、2.79、3.05、3.30、3.53、3.74、3.94 m。实际应用时可以根据需要选择相应的爆破压力及布孔间距。

2.3 爆破次数

同一钻孔,爆破次数的增加,意味着破坏性的增加,其爆破影响半径也会相应增加,在实际应用时可根据爆破孔的物理状况选择爆破次数,在已完成的工业性试验中选择一个钻孔爆破 2~3 次。

3 高压空气爆破致裂增透工艺

高压空气爆破致裂是为了在煤体中形成大量的裂隙,尽可能提高煤体中的裂纹密度和长度,以增加瓦斯流动通道,提高煤层透气性。其工艺分为钻孔选址、钻孔施工、爆破系统连接、爆破筒置入、封孔、起爆 6 个程序。

3.1 爆破流程

高压空气爆破致裂技术流程(图 1):根据爆破地点的地质条件,进行参数设定,系统运行后,螺杆压缩机作为动力气源机械,先进入工作状态,将环境空气压缩至 0.8 MPa 后储存于 0.3 m³ 缓存罐以备为增压泵提供动力,然后介质气源压缩机将环境空气压缩至 35 MPa 后存储于 0.05 m³ 钢瓶,接着压缩机提供的 35 MPa 介质气源进入增压泵,在螺杆机提供的动力下,通过增压泵将空气压力增压到试验所需压力时开启爆破阀,高压空气突然释放剪切破坏爆破片形成高压空气冲击波冲击钻孔周围的煤体,产生大小不一、相互连通的裂隙网络,以达到对煤体致裂、瓦斯抽采增效的目的。

3.2 钻孔选址

高压空气爆破增透工艺中钻孔选址是整个工程

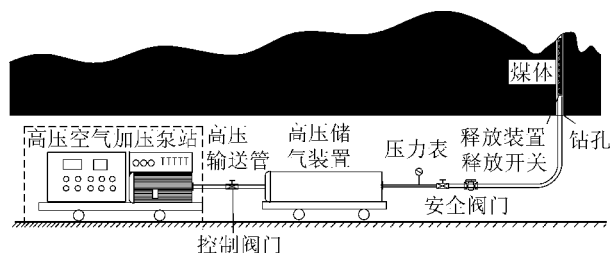


图 1 高压空气爆破工艺流程

Fig. 1 The process diagram of high pressure air blasting

开始的第一步,科学合理的选址关系到试验的成功率和安全性,高压空气爆破钻孔位置必须满足以下因素:①地质因素。在选择位置时要尽量远离地质构造区,钻孔区域不存在陷落柱、断层、地下水富集区,避免钻孔塌孔,避免爆破能量过大诱发突水。②安全因素。尽管高压空气爆破强度远小于炸药爆破,依然要注意避免爆破崩落破损巷道或者煤层弱面,引发矿井事故,作业地点要有一定的支护强度。③施工因素。现场需要打钻、利用钻机往孔内送入爆破筒,要求钻场有一定的作业空间,有打钻所需的照明、电力、水源,避免选择在巷道狭窄,或者是巷道坡度较大不利于放置钻机的地方。④通风因素。泵站和爆破地点要有可靠充足的新鲜风流,为高压空气泵站提供足够冷空气用于压缩空气和冷却泵机,稀释爆破钻孔排放出的瓦斯。

3.3 钻孔施工

爆破钻孔和抽采钻孔,施工单位施工时,钻孔倾角、方位角、孔深、孔径、开孔间距等要符合设计参数要求。采用矿上自备钻机(一般 ZDY-3200 型煤矿用全液压钻机即可)、 $\phi 94$ mm、 $\phi 135$ mm 钻头施工。对于爆破钻孔,先用直径 94 mm 钻头开孔,然后用直径 135 mm 钻头扩孔 5 m,完孔后下直径 108 mm 管封孔 5 m,安装爆破钻孔专用接头,钻孔钻屑须用压风扫净。各类钻孔的施工,施工人员必须熟悉钻孔施工参数和有关规定,严格按照施工参数和有关要求施工,孔位允许误差 ± 100 mm,倾角和方位角允许误差 $\pm 1^\circ$ 。并随时注意观察钻进情况,详细记录孔深、见顶、见底或见断层情况。

3.4 爆破系统连接

爆破系统包含了整个装置和相关配件(图 1),高压空气压缩机出口与高压储气罐之间、高压储气罐与钢管管路系统之间铺设直径 10 mm 的可承受高压并具有一定柔韧性的铜镍合金管。储气罐与控制阀之间连接高压钢管,它由铬钼合金钢组成,能承受 140 MPa 的压强。为了适应井下巷道的弯曲多

变,在拐弯处选择长度为200~3 000 mm的钢管,用直角弯头、T形接头和十字接头连接,可保证整个管路的刚性部分不处于弯曲变形状态,同时可实现管路多分支连接,增加爆破工作面。控制阀与爆破筒之间用高压胶管连接,它可承受100 MPa压力,由多层钢丝(金属丝铠装)编制外附耐磨橡胶而成,单根长度从5~100 m不等。爆破阀和爆破筒之间不应设阀门,爆破阀与爆破筒之间用高压胶管连接至少45 m长。为确保整个系统安全有效的操作,在使用之前需要对于系统进行彻底的内部清理和高压可靠性测试。

3.5 爆破筒置入

采用钻机以机械方式向孔内送入爆破筒。钻孔施工完毕,在高压胶管外包裹防护外套,接着与爆破筒连接管连接好,然后连接爆破筒与 $\phi 50$ mm钻杆,保持钻机位置和倾角固定不动。在推送过程中每隔2~3 m,使用绑扎带将高压胶管与钻杆固定。直至钻机推送爆破筒至煤层指定位置,结束爆破筒置入工作,固定住钻机。

3.6 封孔

根据目前的技术特点,高压空气爆破钻孔在进行爆破时不封孔。只有抽采钻孔需要封孔接入抽采系统。封孔前,必须检查孔内情况。要求孔内无钻屑残留,孔内无垮孔现象。钻孔封孔采用“两堵一注”的封孔方法,封孔材料为水泥砂浆,水灰比1:0.8~1:1,或者是其他经试验证实有效的封孔材料。每个钻孔施工结束即进行封孔联网抽采。封孔深度达到10 m以上,封孔质量要求:封孔饱满,无空隙,钻孔四周不得出现裂缝等漏气点。

3.7 起爆

高压空气爆破使用的是专用爆破阀,连接于高压钢管与高压胶管之间的合适位置。爆破阀是一种快速打开的阀门,目的是为了给爆破组件迅速提供高压空气。带有空气流单向流动和卸压功能,阀门把手打向爆破工作侧,进气孔和出气孔连通,从而控制了高压空气爆破设备的起爆。反方向旋转把手,泄气孔和泄气螺钉连通,从而使高压气体压力释放。

爆破过程:在爆破前,操作人员先检查管路系统主关闭阀是否打开,高压钢管是否固定,高压胶管有无缠绕现象。然后操作人员退后至爆破阀门处,用预先准备好的一个特殊的钥匙打开爆破阀门,将手柄推向爆破工作侧,高压空气流过阀门通过高压胶管进入到爆破筒。当爆破筒内压力大于爆破片的剪切压力时发生

爆破。冲击波和高压空气的迅速扩散能使煤体产生裂隙。当操作人员听到爆破筒排气,关闭爆破阀门,卸掉爆破管内残余高压空气。待安全后,退出爆破筒更换爆破片后重新将爆破筒插入孔内,操作人员返回到爆破阀门处,重复以上的爆破作业。

4 现场验证

现场验证选择在淮南丁集矿,试验煤层为松软煤层,透气性系数为 $0.011\ 12\ \text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,透气性差。试验采用单点爆破释放装置,试验爆破压力为50 MPa,爆破孔与抽采孔孔径均为94 mm,单孔爆破2次。在13-1轨道联络巷进行布孔,严格按照前述爆破工艺要求进行打钻和封孔、管路连接、爆破孔置入以及爆破操作。试验设计了3种对比方式,其中单孔自然排放对比1组,多孔抽采对比1组,煤层透气性系数变化对比1组。部分试验数据如图2所示。

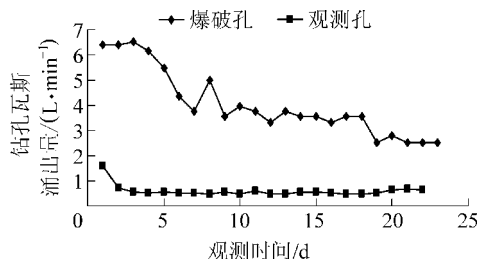


图2 爆破孔与观测孔自然瓦斯涌出情况

Fig. 2 Natural gas emission from blasting hole and observation hole

结果表明,高压空气爆破致裂工艺切实可行,严格按照程序操作后,爆破影响半径达到2.5 m,爆破致裂效果明显,高压空气爆破后钻孔瓦斯流量衰减系数由爆破前的 $0.321\ 7\ \text{d}^{-1}$ 降为 $0.018\ 72\ \text{d}^{-1}$,降低了94%,多孔抽采瓦斯混合量和抽采瓦斯纯量分别大幅增加,煤层透气性系数增大到 $1.138\ 5\ \text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 和 $27.065\ 3\ \text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。

5 结 论

1) 高压空气爆破致裂煤体增透就是在爆破冲击波、高压气体等多种因素的共同作用下,在煤体中形成纵横交错、相互联系的裂隙网络,使煤体透气性系数得到不同程度改善。

2) 高压空气爆破所采用的爆破孔与抽采孔孔径可选择94 mm,单孔爆破次数以2~3次为宜。

3) 通过研究形成了以钻孔选址、钻孔施工、爆破系统连接、爆破筒置入、封孔、起爆为主的高压空气爆破致裂增透工艺。

4) 现场验证结果表明,高压空气爆破致裂增透工艺适用于煤矿井下操作,爆破致裂效果明显,改善了煤层透气性状况,能够起到强化抽采煤层瓦斯的作用。

参考文献 (References):

- [1] 于不凡.煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
- [2] 王魁军,王佑安,许昭泽,等.交叉钻孔预抽本煤层瓦斯[J].煤矿安全,2003,34(9):78-81.
WANG Kuijun, WANG Youan, XU Zhaoze, *et al.* Predrainaging methane from the working seam by cross boreholes[J].Safety in Coal Mines,2003,34(9):78-81.
- [3] 陈 静,王继仁,贾宝山.低透气性煤层瓦斯抽采技术与应用[J].煤炭技术,2009,28(3):70-73.
CHEN Jing, WANG Jiren, JIA Baoshan. Technology and application on gas drainage in low-permeability coal seam[J].Coal Technology, 2009,28(3):70-73.
- [4] 李全贵,翟 成,林柏泉,等.定向水力压裂技术研究与应[J].西安科技大学学报,2011,31(6):735-739.
LI Quanguai, ZHAI Cheng, LIN Baiquan, *et al.* Research and application of directional hydraulic fracturing technology[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011,31(6):735-739.
- [5] 刘明举,孔留安,郝富昌,等.水力冲孔技术在严重突出煤层中的应用[J].煤炭学报,2005,30(4):451-454.
LIU Mingju, KONG Liuan, HAO Fuchang, *et al.* Application of hydraulic flushing technology in severe outburst coal[J].Journal of China Coal Society, 2005,30(4):451-454.
- [6] 王耀锋,李艳增.预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J].煤炭学报,2012,37(8):1326-1331.
WANG Yaofeng, LI Yanzeng. Technology and application of directional hydraulic penetration permeability improvement by guided groove[J].Journal of China Coal Society, 2012,37(8):1326-1331.
- [7] 翟 成,李贤忠,李全贵.煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应[J].煤炭学报,2011,36(12):1996-2001.
ZHAI Cheng, LI Xiangzhong, LI Quanguai. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J].Journal of China Coal Society, 2011,36(12):1996-2001.
- [8] 汪开旺,李守国,张兴华,等.深孔控制水压爆破工艺技术[J].煤矿安全,2011,42(5):44-47.
WANG Kaiwang, LI Shouguo, ZHANG Xinghua, *et al.* The technology of deep-hole hydraulic pressure controlling blast[J].Safety in Coal Mines, 2011,42(5):44-47.
- [9] 邢昭芳,阎永利,李会良.深孔控制卸压爆破防突机理和效果考察[J].煤炭学报,1991,16(2):1-9.
XING Zhao Fang, YAN Yongli, LI Huiliang. Mechanism and results of prevention of rock burst by controlled pressure relief deep holes[J].Journal of China Coal Society, 1991,16(2):1-9.
- [10] 马小涛,李智勇,屠洪盛,等.高瓦斯低透气性煤层深孔爆破增透技术[J].煤矿开采,2010,15(1):92-93.
MA Xiaotao, LI Zhiyong, TU Hongsheng, *et al.* Technology of deep-hole blasting for magnifying permeability in coal seam with high methane-content and low permeability[J].Coal Mining Technology, 2010,15(1):92-93.
- [11] 范迎春,霍中刚,姚永辉.复杂条件下二氧化碳深孔预裂爆破增透技术[J].煤矿安全,2014,45(11):74-77.
FAN Yingchun, HUO Zhonggang, YAO Yonghui. Application of deep hole presplitting blasting and permeability increasing technology by carbon dioxide under complex conditions[J].Safety in Coal Mines, 2014,45(11):74-77.
- [12] 霍中刚.二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J].煤炭科学技术,2015,43(2):80-83.
HUO Zhonggang. New technology of carbon dioxide fracture applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement[J].Coal Science and Technology, 2015,43(2):80-83.
- [13] 周西华,门金龙,宋东平,等.煤层液态CO₂爆破增透促抽瓦斯技术研究[J].中国安全科学学报,2015,25(2):60-65.
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, *et al.* Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO₂ blasting[J].China Safety Science Journal, 2015,25(2):60-65.
- [14] 王魁军,高 坤,李守国,等.高压气体冲击破裂煤体瓦斯预抽方法与装备:中国,ZL200910012055.3[P].2013-03-06.
- [15] 高 坤,王继仁,贾宝山,等.高压空气冲击煤体增透技术试验研究[J].矿业安全与环保,2011,38(6):9-14.
GAO Kun, WANG Jiren, JIA Baoshan, *et al.* Experimental study on the technology of increasing permeability by drilling the coal bed with high-pressure gas[J].Mining Safety & Environmental Protection, 2011,38(6):9-14.
- [16] 高 坤.高能气体冲击煤体增透技术试验研究及其应用[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [17] 李守国.高压空气爆破煤层增透关键技术与装备研发[J].煤炭科学技术,2015,43(2):92-95.
LI Shouguo. Key technology and equipment research and development of improving coal seam permeability by high pressure air blasting[J].Coal Science and Technology, 2015,43(2):92-95.
- [18] 汪开旺.高压空气爆破致裂效果影响因素分析[J].煤矿安全,2017,48(5):184-186,190.
WANG Kaiwang. Analysis of factors influencing crack effect by high pressure air blasting[J].Safety in Coal Mines, 2017,48(5):184-186,190.
- [19] 汪开旺.高压空气爆破技术装备研发及应用[J].煤炭科学技术,2016,44(12):136-140.
WANG Kaiwang. Research and development and application of high pressure air blasting technology and equipment[J].Coal Science and Technology, 2016,44(12):136-140.
- [20] 徐 颖.高压气体爆破采煤技术的发展及其在我国的应用[J].爆破,1998,15(1):67-82.
- [21] 聂荣山.高压空气爆破煤体弹性分析[J].现代矿业,2016,8(8):282-283.
NIE Rongshan. Elastic analysis of high pressure air blasting coal seam[J].Modern Mining, 2016,8(8):282-283.