

适用井下钻孔的高能射孔增透技术 研究与应用

易光藕¹, 张小军², 廖文德^{3*}, 叶小军⁴

(1.江西省投资集团有限公司,江西 南昌 330036;2.江西省应急管理科学研究院,江西 南昌 330095;
3.江西省减灾备灾中心,江西 南昌 330105;4.南昌大学 机电工程学院,江西 南昌 330103)

摘要:针对低透气性煤层瓦斯难以抽采技术难题,以江西涌山煤矿抽采瓦斯钻孔为研究对象,依循聚能爆破原理,采用 LS-DYNA 软件模拟高能复合射孔弹产生高能气体侵彻煤层应力变化与裂缝拓展情况,得到高能复合射孔弹侵彻煤层深度,同时设计一种适用煤矿井下钻孔的高能复合射孔弹弹架及其固封装置,最终在煤矿井下试验成功.模拟研究与现场试验结果表明:高能复合射孔弹爆破压裂具有一定的方向性;压裂出的裂缝以纵向裂缝为主,同时随着射流动能降低,纵向裂缝也逐渐尖灭,侵彻煤层深度(即压裂影响半径)约 1.65 m;同一射孔弹架中的多个射孔弹起爆后形成的金属射流相互影响较小,且金属射流对压裂孔周围煤层的扰动随着金属射流与压裂孔壁距离的加大而逐渐减弱.

关键词:高能复合射孔;煤矿井下;增透技术

中图分类号:X936 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)03-0060-06

Research and Application of High Energy Perforating and Permeability Increasing Technology for Downhole Drilling

YI Guang'ou¹, ZHANG Xiaojun², LIAO Wende³, YE Xiaojun⁴

(1. Jiangxi Provincial Institute of Coal Industry Science, Nanchang 330036, China;

2. Jiangxi Academy of Emergency Management, Nanchang 330095, China;

3. Jiangxi Disaster Reduction and Preparedness Center, Nanchang 330105, China;

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330103, China)

Abstract: Aiming at the difficult technical problem of gas drainage in low permeability coal seam, taking Yongshan Coal Mine gas drainage borehole of Jiangxi Coal Industry Group Co., Ltd. as the research object, according to the principle of shaped charge blasting, LS-DYNA software is used to simulate the stress change and fracture expansion of high-energy gas produced by perforating charge penetrating into coal seam, and the penetration depth of shaped charge penetrating into coal seam is obtained. At the same time, a kind of perforating charge frame and its sealing device suitable for coal mine borehole are designed. The coal mine underground test is successful. The results of simulation study and field test show that the high-energy composite perforating charge blasting fracturing has certain directionality; the fractured fractures are mainly longitudinal fractures, and with the decrease of jet kinetic energy, the longitudinal fractures gradually pinch out, and the penetration depth, i. e. fracturing radius of coal seam is about 1.65 m. The metal jet formed by multiple perforating charges in the same frame has few influence on each other, and the disturbance of the metal jet to the coal seam around the fracturing hole gradually weakens with the increase of the distance between the metal jet and the fracturing hole wall.

Keywords: high energy composite perforation; underground coal mine; anti-reflection technology

收稿日期:2021-01-20

基金项目:江西省科技计划基金资助项目(20133ACG70009)

*通信作者,E-mail:451838102@qq.com

国内外的煤矿生产实践表明,矿井瓦斯抽采是控制采掘空间瓦斯浓度、消除采掘工作面瓦斯突出危险的一种有效途径,是解决瓦斯灾害问题的根本办法^[1-2]。原始煤层的抽采瓦斯效果主要取决于煤层的透气性系数^[3-4],如何加大低透煤层瓦斯抽采钻孔单孔流量或流速,提高煤层瓦斯抽采率,是现阶段国内外煤层瓦斯抽采、防治煤与瓦斯突出工作急需解决的关键问题之一。为了提高煤层的透气性,国内外学者分别从不同方向研究了增透技术,其中国内学者提出:

1)降低煤层对瓦斯的吸附能力,增加煤层可解吸瓦斯量,增加煤层透气性。如宋超等^[5]为了揭示声震法提高煤层气抽采率的微观机理,通过扫描电镜、比表面积及孔径分析仪、核磁共振分析仪研究了超声波处理对煤微观结构的影响;郭红玉等^[6]通过显微镜发现不同煤阶煤经二氧化氯浸泡后均有不同程度的刻蚀,且煤阶越低,刻蚀越严重,试验证实二氧化氯可以提高煤层渗透率,而且原始煤储层渗透率越高,渗透率增加的幅度越显著;王乔等^[7]为解决煤层气排采效率低的问题,采用CT扫描的精细观测手段,对煤样进行钻孔注液氮试验,并分析其致裂过程与增透效果;王聪等^[8]利用自制低频激励瓦斯解吸及测量装置,研究低频振动和声波对瓦斯解吸的综合影响。

2)对煤层进行扰动,使煤层的裂缝增多,从而增加瓦斯逸散通道和煤层的透气性。如潘文霞等^[9]借助高压水的动力效应(气蚀、振动、冲击等)诱发煤层应力场及矿岩裂隙发育的动态进程,加速提高高瓦斯煤层的裂隙发育,增大煤层透气性,进而为煤层瓦斯抽采创造有利条件;刘东、刘文^[10]为了提升煤层瓦斯抽采效率,减少矿井瓦斯抽采工程量和抽采时间,讨论了水力冲压卸压增透机制,详细阐述了水力冲压卸压增透技术的工程实施模式;龙威成等^[11]为了提高顺煤层钻孔瓦斯抽采效果,在分析井下煤层水力压裂技术发展现状及其增透机理的基础上,结合定向长钻孔施工技术与煤层水力压裂增透强化抽采技术,提出了顺煤层定向长钻孔裸孔坐封、水力压裂增透技术工艺;有学者针对高瓦斯低透气性煤层的瓦斯预抽难题,提出顺层密集大直径钻孔布置和并管提(负)压的瓦斯强化抽采技术,阐述了顺层密集大直径钻孔布置实现全区域增透的抽采原理^[12-13];还有学者就平煤十三矿瓦斯压力高、含量高,前期水力冲孔效果不理想,钻孔后期抽采效率低等情况,将液态CO₂相变致裂技术应用于煤层二次增透,阐述相变致裂机理,分析液态CO₂相变致裂技术优势,考察相变致裂效果^[14-15];再有学者为了研究高瓦斯低透气性煤层穿层深孔爆破增透效果,以淮南丁集煤矿13-1煤层为工程背景,提出了煤-岩界面装药穿层爆破的方法,设计了爆破增透的实物模型,运用超动态测试系统分别实测了模型装药爆炸后煤与岩各层的爆炸波信号,观察了裂缝的分布情况^[16-17]。

但在松软低透气性煤层的煤与瓦斯突出矿井使用时,以上方法增透效果均不明显。21世纪初,高能复合射孔增透技术已逐步在我国的石油和天然气、地面井煤层气开采中试验与推广成功,目前已取得了较为满意的增产效果^[18-20]。

笔者以江西煤业涌山煤矿井下抽采瓦斯钻孔为研究背景,依循射孔弹聚能爆破原理,采用LS-DYNA软件^[21]模拟高能复合射孔弹产生的高能气体侵彻煤层的应力与裂缝拓展情况,得到高能复合射孔弹侵彻煤层深度,同时设计一种适用煤矿井下钻孔的射孔弹弹架及其固封装置,然后在井下试验应用。试验结果表明,在煤矿井下钻孔中采用高能复合射孔增透技术,增透效果明显。

1 工程概况

涌山煤矿位于江西乐平涌山桥矿区横洛—涌山向斜东北段,矿区总体为一向斜构造,向斜走向38°N~54°E,自西向东逐步向北偏移,大致呈弧形,轴面大部呈直立状态。向斜西北翼大部分地层被F₈逆冲断层组切割破坏,安源煤系之下煤组仅在-400 m水平以下发育,向斜东南翼煤层保存较完好。地层倾角一般在60°~80°,局部倒转,浅部岩层倾角较陡,往深部和向斜轴部逐渐平缓,下煤组煤层倾角较陡,上煤组煤层倾角逐渐平缓。

涌山煤矿开采二迭系安源煤组,主采的二、三、四、五、六、八煤均为煤与瓦斯突出危险煤层,煤层瓦斯

参数见表1,属难抽采煤层.

表1 煤层瓦斯参数

煤层	瓦斯压力 P/MPa	瓦斯含量 $Q/(\text{m}^3/\text{t})$	透气性系数 $\lambda/(\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d}))$	衰减系数 α/d^{-1}	放散初速度 $\Delta P/\text{mmHg}$	坚固性系数 $f/(\text{kg}/\text{cm}^2)$
二	1.16	20.11	0.049	0.565 5	25.96	0.47
三	0.30	16.11	0.082	0.301 2	13.99	0.39
四	0.56	19.39	0.036	0.133 9	22.24	0.46
五	1.00	25.17	0.012	0.273 0	19.74	0.31
六	0.60	18.51	0.021	0.583 4	17.37	0.30
八	0.85	26.9	0.013		14.13	0.45

2 高能复合射孔增透技术 LS-DYNA 模拟分析

2.1 高能复合射孔

射孔弹是在射孔过程中用于穿透套管和地层的火工产品.而高能复合射孔弹是使用最广泛的射孔弹,也是射孔效率最高的射孔弹,其结构主要有壳体、起爆药、主炸药和药形罩,如图1所示.

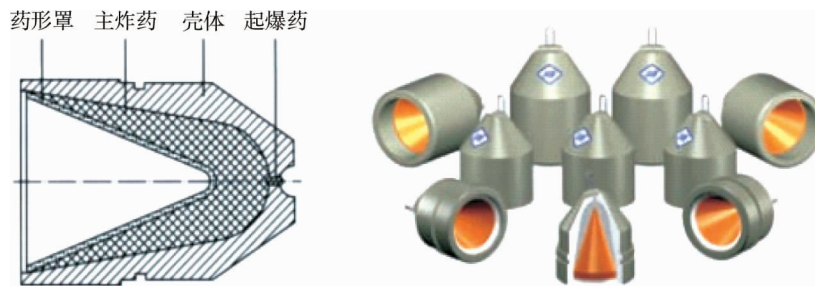


图1 高能复合射孔弹结构及实物

2.2 高能复合射孔增透原理

技术原理主要是利用高能复合射孔弹爆炸产生的高温高压金属射流压裂钻孔孔壁,对煤层和围岩施加脉冲载荷,同时渗透钻孔周围煤和岩体,形成多条辐射状裂缝,且与煤层和围岩中的天然裂缝相沟通,最终有效提高钻孔周围煤和岩层的透气性.其加载与造缝过程如图2所示.

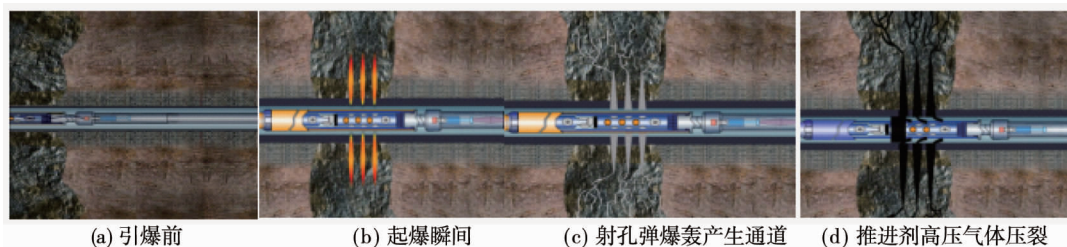


图2 加载造缝模拟过程

2.3 压裂过程煤层应力变化及裂缝拓展情况

为了确定高能气体压裂前后的煤层应力变化情况,以涌山煤矿六煤层(其围岩力学指标如表2所示)的实际赋存条件为例,现场拟采用 DP43RDX45-1 型高能复合射孔弹建立几何模型和材料模型,设定相关参数,并进行数值模拟,得到煤层压裂后的钻孔周围应力变化情况和压裂后煤层裂缝拓展情况,如图3所示.

高能复合射孔弹爆破压裂具有一定的方向性,高能复合射孔弹引爆后的射流方向与聚能穴的方向一致,不会像煤矿许用炸药爆炸后形成球形空洞.

同一射孔弹架的多个高能复合射孔弹起爆后形成的金属射流相互影响较小,且金属射流对压裂孔周

围煤层的扰动随着其与压裂孔壁距离的加大而逐渐减弱。

表2 六煤层及围岩力学指标

岩性	弹性模量/GPa	密度/(g/cm ³)	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	38	2.60	2.00	12	36
六煤	4.5	1.46	3.62	3.75	22
细砂岩	37	2.70	10.00	18	35
粉砂岩	38	2.60	1.50	12	36
细砂岩	37	2.70	10.00	18	35
粉砂岩	38	2.60	1.50	12	36
五煤	4.6	1.38	3.00	3.5	20
粉砂岩	38	2.60	1.50	12	36
砾岩	50	2.70	5.00	13	25
细砂岩	37	2.70	10.00	18	35

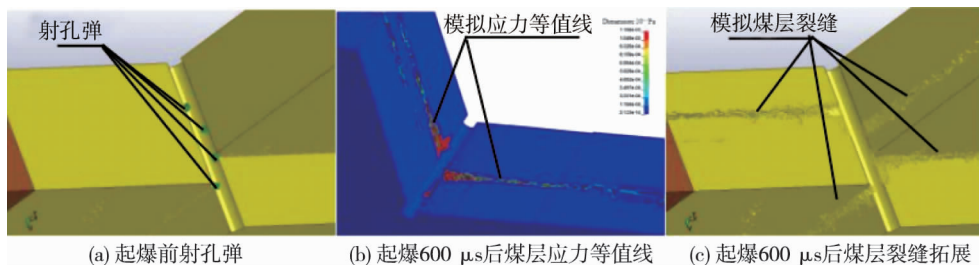


图3 起爆前高能复合射孔弹安装及起爆 600 μs 后煤层应力等值线和煤层裂缝拓展情况

2.4 侵彻煤层深度

模拟过程中采用后处理软件对数据进行处理,得到侵彻煤层深度随时间的变化曲线,如图4所示。

从图4可知:侵彻煤层深度随时间变化逐渐增加,0~70 μs 期间侵彻呈加速状态,110~160 μs 期间则为侵彻减速过程,直至停止侵彻,侵彻深度(即影响半径)约为 1.65 m。

涌山煤矿六煤层不采取任何增透技术时的钻孔抽采半径约为 2.0 m,通过压裂技术对煤体进行 1.65 m 的

侵彻破坏后,将较大程度提升钻孔抽采半径。随后射孔弹产生的爆生气体持续对煤层裂缝进行冲刷,大大提升了煤层透气性。由高温射流侵彻煤层模拟结果可知,合理布置射孔弹弹架,可以保护煤层顶底板不受破坏,同时增加增透技术现场施工的安全。

3 现场试验及其效果

3.1 试验地点及钻孔施工情况

32 采区六煤-410 m 底板巷从-410 m 石门开门后,沿六煤与五煤之间细砂岩、粉砂岩层位顺层掘进,巷道位置上距六煤 15 m,下距五煤 20 m。六煤倾角平均 78°,厚度平均 1.85 m。在六煤底板巷施工 1# 钻场,设计钻场齐头距六煤垂距不大于 8 m。高能复合射孔弹压裂孔垂直并穿透煤层施工。1#~8# 效果考察钻孔分布于高能复合射孔弹压裂孔两侧,平行于高能复合射孔弹压裂孔施工,终孔间距以高能复合射孔弹压裂孔为基点分别控制在 2,3,4,5,6,7,8,9 m。为了观察压裂前后的钻孔抽采瓦斯效果,在 1#~8# 考察钻孔影响范围之外,施工 4 个对比钻孔 9#~12#,其参数与压裂孔参数一致,孔间距均为 2 m。

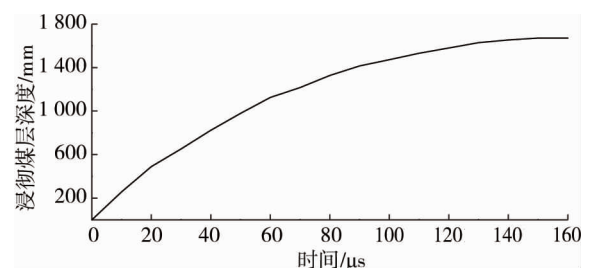


图4 射流侵彻煤层深度随时间变化曲线

3.2 高能复合射孔弹及弹架安装方法

3.2.1 高能复合射孔弹的安装

从包装箱内取出高能复合射孔弹,依次装入配套的弹架(筒)后,用卡圈固定牢固.从弹架尾端开始,将煤矿许用瞬发电雷管放入压裂弹尾部卡槽内,用木质工具弯曲弹头上的压环压紧电雷管,使电雷管的聚能穴部位紧帖住压裂弹的起爆孔(弹槽内金色圆箔下为传爆孔),并用胶布粘稳,依次装配完.

3.2.2 高能复合射孔弹弹架的安装

弹架安装是复合射孔试验过程最关键环节,直接影响整个试验的成功与否.由于煤层厚度及钻孔施工过程中偏斜的影响,其高能复合射孔弹弹架不宜太长,本次试验项目组建议控制在 1.5 m 以内.射孔弹弹架由镀锌管缓慢送入压裂钻孔内,待孔外留有 15~25 cm 富余时停止运送,再连接一根镀锌管(管长约为 4~5 m),以此类推,直至射孔弹弹架安装至预定的位置,每个射孔弹由 1 个煤矿用雷管起爆,雷管脚线穿过弹架并用透明胶固定,在封口端将锥形木楔连接送入钻孔内,镀锌管从锥形木楔穿过连接深部的镀锌管.射孔弹装药结构如图 5 所示.

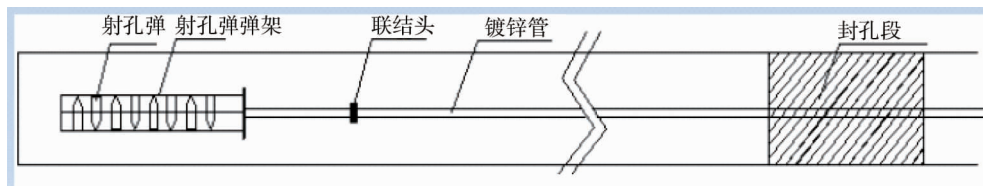


图 5 射孔弹弹架安装

3.3 试验效果

3.3.1 压裂前后抽采瓦斯量对比

为了对比压裂前后的抽采效果,在爆破压裂后,将 1[#]~8[#]效果考察钻孔和 9[#]~12[#]压裂对比钻孔接入抽采主管进行抽采,每 3 d 观测一次数据,各考察钻孔及对比钻孔单日平均瓦斯流量结果如图 6 所示.采用回归分析法得到各孔的瓦斯流量衰减系数,其中 1[#]~8[#]考察钻孔的衰减系数分别为 0.048,0.051,0.049,0.050,0.023,0.046,0.061,0.056 d⁻¹;9[#]~12[#]压裂钻孔的衰减系数分别为 0.057,0.052,0.051,0.055 d⁻¹.

从图 6 可看出,5[#]孔单日平均抽采瓦斯流量比其他 11 个孔大,尤其是 30 d 后差距更大,而其瓦斯流量衰减系数较其他 11 个孔小,其他 11 个孔的单日平均抽采瓦斯流量和瓦斯流量衰减系数均相差不大.这说明高能复合射孔弹爆破压裂后,高能气体对压裂钻孔 2 m 半径内的煤层造成了一定的应力变化,煤层增加了裂缝,瓦斯逸散通道更加畅通.

3.3.2 压裂影响半径考察

为了得到较精确的压裂影响半径,在 1[#]钻场距离压裂钻孔 1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9 m 呈圆形布置 8 个钻孔 13[#]~20[#],测定各孔瓦斯流量,其结果如图 7 所示.

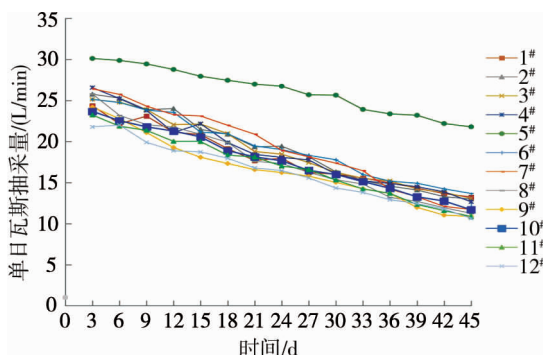


图 6 效果考察钻孔与压裂对比钻孔单日平均瓦斯流量

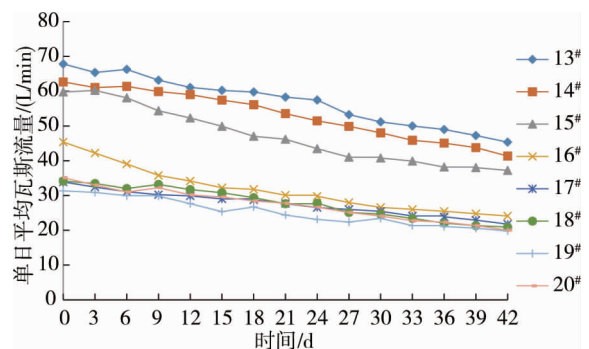


图 7 压裂半径考察孔单日平均瓦斯流量

从图7可看出,随着考察钻孔与压裂孔间距加大,其最大单日平均瓦斯流量逐渐减少,间距在1.8,1.9 m时的最大单日平均瓦斯流量与间距在1.6,1.7 m时的比较,衰减尤为明显,对照模拟结果,可以判定射孔弹压裂影响半径约1.6~1.7 m.

4 结论

1)采用LS-DYNA软件模拟DP43RDX45-1型高能复合射孔弹产生的高能气体侵彻涌山煤矿六煤层的应力与裂缝拓展情况,得到侵彻煤层深度(即影响半径)约为1.65 m.现场试验得到高能复合射孔弹压裂影响半径在1.6~1.7 m,与模拟结果吻合.

2)根据煤矿井下巷道条件研发的射孔弹弹架及其固封装置,能很好地适应煤矿井下巷道断面小和钻孔施工存在偏斜度、装药阻力较大等特殊状况,为高能气体增透技术应用于煤矿井下钻孔提供了一种全新方案.

3)由于计算机的计算能力有限,在运用ANSYS/LS-DYNA进行仿真模拟过程中,对几何模型、边界条件进行了简化,且网格划分较稀疏,后续研究需加强对模型以及网格划分的规范,并根据现场实际情况设定边界条件,从而得出更精确的结论.

参考文献:

- [1] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
- [2] 袁亮,薛俊华,张农,等.煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2013,41(9):6-11.
- [3] 王兆丰,陈滔,潘丰茂,等.极近距离上邻近层瓦斯抽采试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(1):12-16.
- [4] 林柏泉,张建国,刘厅.煤矿瓦斯高效抽采及分布式利用关键技术[J].山西焦煤科技,2017,41(Z1):17-21.
- [5] 宋超,姜永东,王苏健,等.超声波作用下煤体微观结构的试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(5):139-144.
- [6] 郭红玉,苏现波,陈俊辉,等.二氧化氯对煤储层的化学增透实验研究[J].煤炭学报,2013,38(4):633-636.
- [7] 王乔,赵东,冯增朝,等.基于CT扫描的煤岩钻孔注液氮致裂试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(4):149-154.
- [8] 王聪,王峰,贾剑,等.低频激励的煤体瓦斯解吸试验[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(7):683-688.
- [9] 潘文霞,张瑞新.急倾斜煤层群水力增透防突技术研究与应用[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [10] 刘东,刘文.水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):136-141.
- [11] 龙威成,赵乐凯,陈冬冬,等.顺煤层定向长钻孔水力压裂煤层增透技术及试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(3):10-15.
- [12] 陈久福,魏晋忠,张国江,等.大直径钻孔联合孔内下套护孔增透技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):73-77.
- [13] 谢生荣,杨波,张晴,等.低透气性煤层顺层密集钻孔抽采及并管提压系统研究[J].矿业科学学报,2019,4(1):34-40.
- [14] 王兆丰,周大超,李豪君,等.液态CO₂相变致裂二次增透技术[J].河南理工大学学报(自然科学版),2016,35(5):597-600.
- [15] 王子雷.CO₂致裂器深孔预裂煤体裂隙扩展范围试验研究[J].煤矿安全,2017,48(6):24-27.
- [16] 张燕斌.深孔松动爆破在阳煤新景矿的应用研究[J].能源技术与管理,2015,40(4):79-81.
- [17] 王道阳,申夏夏,杨雷,等.穿层深孔爆破煤-岩界面装药增透试验研究[J].煤炭工程,2015,47(12):48-51.
- [18] 阿哈旦·哈银扎尔.现代油气井射孔技术发展现状与展望[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(22):214-215.
- [19] 张光波,贾慧敏,覃蒙扶,等.煤矿区煤层气井地面抽采技术及应用[J].中国煤层气,2019,16(2):30-34.
- [20] 王浩.页岩气储层高能气体压裂液体火药配方优化研究[D].西安:西安石油大学,2017.
- [21] 徐景德,彭兴力,齐睿琛,等.基于LS-DYNA的金属射流侵彻煤层仿真模拟[J].华北科技学院学报,2016,13(4):70-72.