

骆家宁,谢雄刚,杨家向,等.煤巷条带超高压水力割缝增透试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(1):19-24. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.003

LUO J N, XIE X G, YANG J X, et al. Experimental Study on Anti-reflection of Ultra-high Pressure Hydraulic Seam in Coal Roadway [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(1):19-24. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.003

煤巷条带超高压水力割缝增透试验

骆家宁¹,谢雄刚^{1*},杨家向²,熊欣标¹,梁海彬¹,曹文梁³

(1.贵州大学矿业学院,贵州贵阳550025;2.贵州省盘州市能源局,贵州六盘水553537;
3.中煤科工集团沈阳研究院有限公司,辽宁沈阳110015)

摘要:针对林华煤矿20917综采工作面瓦斯治理时间长、难度大和透气性低导致的瓦斯抽采效率差等问题,对超高压水力割缝技术进行了研究和利用,以本矿煤巷条带区域9#煤层为试验对象进行卸压增透,提高瓦斯抽采效率,降低在抽采过程中伴随的煤与瓦斯突出风险。设计布置了割缝钻孔和普通钻孔进行对比,并记录了9#煤层割缝前后的钻孔和瓦斯抽采数据进行分析。结果表明:割缝钻孔平均排出的煤屑量为3.3 t,日平均瓦斯抽采浓度相比普通钻孔提高1.61倍,瓦斯抽采纯量相比普通钻孔提高了约2.04倍。超高压水力割缝技术可对煤层的透气性进行较大程度的改善,且能有效地提高瓦斯抽采效率,可以解决由于低透气性带来的煤巷条带煤层掘进速率问题。

关键词:煤巷条带;超高压水力割缝;低透气性;瓦斯抽采

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)01-0019-06

Experimental Study on Anti-reflection of Ultra-high Pressure Hydraulic Seam in Coal Roadway

LUO Jianing¹, XIE Xionggang¹, YANG Jiexiang², XIONG Xinbiao¹, LIANG Haibin¹, CAO Wenliang³

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Panzhou Energy Bureau of Guizhou Province, Liupanshui 553537, China;
3. Shenyang Research Institute Co., Ltd. of CCTEG, Shenyang 110015, China)

Abstract: Aiming at the problems of gas extraction efficiency caused by long time and difficulty in 20917 fully mechanized coal face of Linhua Coal Mine, and low permeability, the ultra-high pressure hydraulic seam cutting technology is studied and analyzed. The No.9 coal seam in the coal lane strip area of the mine is taken as the test object for pressure relief and permeability improvement, so as to improve the efficiency of gas extraction and reduce the risk of coal and gas outburst in the extraction process. The slit drilling and ordinary drilling are compared, and the drilling and gas extraction data of No.9 coal seam before and after seam cutting are recorded for analysis. Results show that the average amount of coal cuttings discharged from slotted boreholes is 3.3 t, the daily average gas drainage concentration is 1.61 times higher than that of ordinary boreholes, and the net gas drainage amount is about 2.04 times higher than that of ordinary boreholes. Ultra high pressure hydraulic slotting technology can greatly improve the permeability of coal seam, effectively improve the gas drainage efficiency, and

收稿日期:2021-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51864009;52164016);贵州省教育厅青年成长人才项目资助(黔教合ky字[2018]414)

*通信作者,E-mail: 414922360@qq.com

solve the problem of coal roadway strip coal seam tunneling rate caused by low permeability.

Keywords: coal roadway strip; ultra-high pressure hydraulic slotting; low permeability; gas extraction

贵州煤矿多为煤与瓦斯突出矿井,矿井瓦斯灾害严重,利用煤层钻孔对瓦斯进行预抽采是已知能够预防煤与瓦斯突出的有效手段之一^[1].且贵州多数煤层分布于地质构造带之上,煤层结构复杂、透气性较差,严重影响煤层瓦斯的抽采效率,导致抽采过程中伴随着极高的煤与瓦斯突出风险,因此,如何利用先进技术和装置增强煤层透气性,在保证安全的前提下提高开采煤层的掘进速率,是当下煤矿企业致力于提高矿井经济效益、保证井下安全生产必须解决的难题^[2-3].

顺应煤炭行业发展的需要,高压水射流技术日趋完善,在媒体钻孔施工、割缝破裂方面已有成效,能够增大钻孔直径,提升抽放效果,但却不能有效地解决钻孔排渣遗留问题,而排渣效果的好坏对最终打出的钻孔长度和抽采效率、甚至是该方法的广泛推广有着重要的影响^[4].煤矿所用的普通水力冲孔设备和高压设备能达到的最大压力也只有 20 和 60 MPa,不能有效地对钻孔进行卸压,在低透气性煤层增透效果及施工效率上存在局限,影响了成套技术的推广应用^[5-6].

为提高煤巷条带区域的煤巷掘进速度,加快瓦斯抽采达标进程,拟在林华煤矿 9# 煤层采取超高压水力割缝技术,进行增透试验研究,以缩短抽采时间,最终降低伴随在抽采过程中的煤与瓦斯突出风险,促进煤矿安全高效地发展和防治煤与瓦斯突出.

1 超高压水力割缝技术

1.1 超高压水力割缝原理

超高压水力割缝技术是指利用超高压水泵的超大荷力发射出高压水流,再利用高压设备和专用钻机把高压水流送至抽采钻孔的孔底并由喷嘴喷出,从而形成了一种力量高度集中的细束高压水流,利用高压水流产生更高的渗透、冲蚀等本领,从而实现了煤体的强力冲击,进而对煤体构成剪切与破碎^[7-8].

水力割缝是通过高压旋转水射流技术对煤体进行冲刷施压,使煤体更多地暴露于外,同时,为充分卸除煤层内部压力、加快瓦斯释放速度提供了很好的前提条件,也可以在一定范围内充分卸除存在于缝槽周边煤体的压力,进而提高煤层的透气性^[9].由于冲击地压的作用,缝槽周围的煤体产生了不规则的空间运动,其被高压旋转水射流进行了一段时间的冲击、剪切作用后,高压水流会将割缝钻孔四周的部分煤体冲落并运走,形成扁平状缝槽空间,使煤体裂隙进一步扩大,能够使煤层中的瓦斯流动状态被较大程度地改善,有利于煤层瓦斯的顺利排放,同时也使煤体的原始应力以及裂隙状况有所改变,相对减缓了围岩和钻孔周围的应力集中,不仅较大程度地提高了煤层强度,还使突出的动力有所减弱甚至消除,有效达到最基本的防突目的,煤层的透气性和瓦斯释放能力得到极大的提升^[10].

煤层煤岩与常规储集岩不同,可塑性强、对应力变化较为敏感,有效应力对煤层渗透率的影响也较大.其中有效应力与渗透率之间的关系为

$$K_r = 1.03 \times 10^{(-0.31\sigma)}. \quad (1)$$

式中: K_r 为渗透率; σ 为有效应力.

同时,地应力产生的各种变化也会给煤层渗透率带来很大影响,两者之间呈指数变化关系,如式(2)所示^[11].

$$\frac{K}{K_0} = e^{3gC\Delta\sigma}. \quad (2)$$

式中:在给定应力条件下,煤层的渗透率与初始渗透率比值为 $\frac{K}{K_0}$; $e \approx 2.718 28$; g 为重力加速度; C 为煤的孔隙压缩系数; $\Delta\sigma$ 为初始应力到某种应力状态的有效应力变化量.

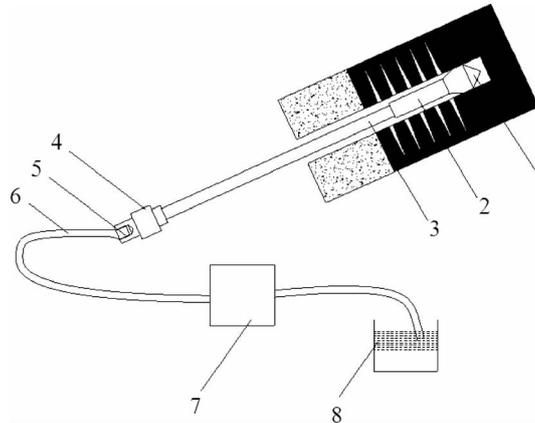
由式(2)不难得到,如果地应力不断增大,煤体将持续被压缩、孔隙变小,最终导致裂隙闭合.如果流体

压力持续减小,将会使有效应力持续增大,此时外界对煤岩施加压力,割理将缓慢紧闭,进一步地降低煤层孔隙度和渗透率.

1.2 试验装置

1.2.1 装置结构及工艺系统

本次试验采用 GF-100 型超高压水力割缝卸压增透装置,工艺组成如图 1 所示^[12].



1-金刚石水力割缝钻头;2-高低压转换器;3-水力割缝浅螺旋钻杆;4-超高压旋转接头;
5-螺纹接头;6-超高压橡胶管;7-超高压清水泵;8-水箱

图 1 超高压水力割缝工艺

1.2.2 装置特征

GF-100 型超高压水力割缝装置主要适用于煤层地应力较高、瓦斯含量大、透气性较低等情况,顺层钻孔和穿层钻孔的割缝钻孔深度处于同一水平,一般都在 80~100 m.具体性能指标主要有 3 点:(1)切割半径的长度为 1 500~2 000 mm;(2)切割缝隙宽约 6~10 mm;(3)整体割缝系统能够进行远距离压力输送,可在 80~200 m 内进行运输.

1.2.3 装置技术特点及参数

该装置结构简单、操作方便、实用性高、工艺流程很短且割缝效率高;使用的是易于井下安装放置的小体积超高压水泵;使用采取双密封措施的割缝钻杆,高压胶管、钻杆和水尾构成的总体能够承受 100 MPa 以上的压力;该装备既能有效地防止顺层长钻孔出现大范围增透,又能处理穿层钻孔在进行割缝时出现透气性过大的情况;割缝半径为 1 500~2 000 mm,能够较大程度地使钻孔施工工作量有所降低,提高抽采效率.技术参数如表 1 所示.

表 1 GF-100 型超高压水力割缝装置技术参数

名称	技术参数
超高压旋转接头	承受高压 140 MPa, 转速 200 r/min, 直径 63 mm
金刚石水力割缝钻头	Φ113 mm, Φ94 mm 接水力割缝浅螺旋钻杆
水力割缝浅螺旋钻杆	Φ73 mm, Φ63 mm, Φ50 mm, 可承受高压 100 MPa, 承受扭矩大于 1 500 N·m
高低压转换器	直径 63, 73 mm, 喷嘴 (2.0, 2.5, 3.0 mm) .
超高压清水泵	额定流量 80 l/min、额定流量 125 l/min, 额定压力 100 MPa
工作参数: 割缝半径 1 500~2 000 mm, 割缝介质的坚固性系数: $f > 0.4$	

2 超高压水力割缝试验方案

2.1 矿井及试验工作面概况

试验矿井属于贵州林华矿业有限公司,其位于贵州省毕节市金沙县新化乡,煤矿总面积 21.8 km²,井田内总资源量为 16 190 万 t,其中可采储量有 9 835 万 t,煤矿规模是根据原国家计委批准进行设计的,年

产 150 万 t,井田内主要开采煤层 9[#]大部分为优质无烟煤,具有高发热量、低硫、低灰的特点.本矿的设计生产能力为 150 万 t/a,服务年限 51 a.井田内含煤煤层为 9[#]~21[#],属于龙潭组地层,4[#],5[#],9[#],13[#],15[#]煤层是可采和局部可采区域.由于矿井 9[#]煤层瓦斯含量高达 18~23 m³/t,为突出煤层,其煤巷条带抽采达标时间长,难以高效地对煤巷条带区域瓦斯进行治理,使井田内煤层采掘工作交替时间紧迫.因此,采用超高压水力割缝技术对其进行卸压增透,以提高瓦斯抽采效率.

根据贵州省安全科学研究院 2014 年 7 月提交的《贵州林华矿业有限公司林华煤矿+800 水平 9[#]煤层瓦斯参数测试报告》,其中包括对 9[#]煤层最基本的瓦斯参数测定,测试结果如表 2 所示.

表 2 林华煤矿 9[#]煤层瓦斯参数

煤层	瓦斯含量/(m ³ /t)	衰减系数/d ⁻¹	透气性系数/ (m ² /(MPa ² ·d))	瓦斯放散初速度 ΔP /mmHg	煤的坚固性系数 f	瓦斯压力 P /MPa
9 [#]	23.42	0.05~7.17	0.064~0.165	33	0.35	2.05

2.2 超高压水力割缝钻孔设计

为增加 20917 综采工作面煤巷条带抽采效果,使瓦斯抽采量和抽采浓度都有所提升,加快瓦斯抽采达标进程,特针对 20917 综采工作面煤巷条带区域 9[#]煤层实施超高压水力割缝卸压增透措施.

根据本矿在 20917 综采工作面煤巷条带的工作情况,部分顶板穿层钻孔已完成施工,在 20917 综采工作面根据已施工情况,利用超高压水力割缝对煤巷条带进行增透钻孔的补充施工,每组间隔预先设计为 100 m,钻场规格设计为 3.0 m×2.5 m,部分压茬距离预留 20 m,紧接着迎头按计划布置 9 个顺层长钻孔,对巷道正方向 80 m 内区域进行控制,巷道两侧的宽度布置为 15 m(本矿 9[#]煤层倾角为 21°<25°,根据 2019 版《防治煤与瓦斯突出细则》第六十四条,巷道两帮宽度至少为 15 m),割缝钻孔最终以 5 m 作为其终孔间距(结合已开展割缝情况,割缝深度 1.5~2.0 m);从孔底开始,对钻孔进行割缝时,每 3 m 进行一次切割,当切割快进行到迎头 20 m 处时停止割缝,并对各个割缝孔都完成 20~21 刀的切割,那么每次完整的循环会对这 9 个钻孔共完成 180~190 刀的累计切割量,如图 2 所示.

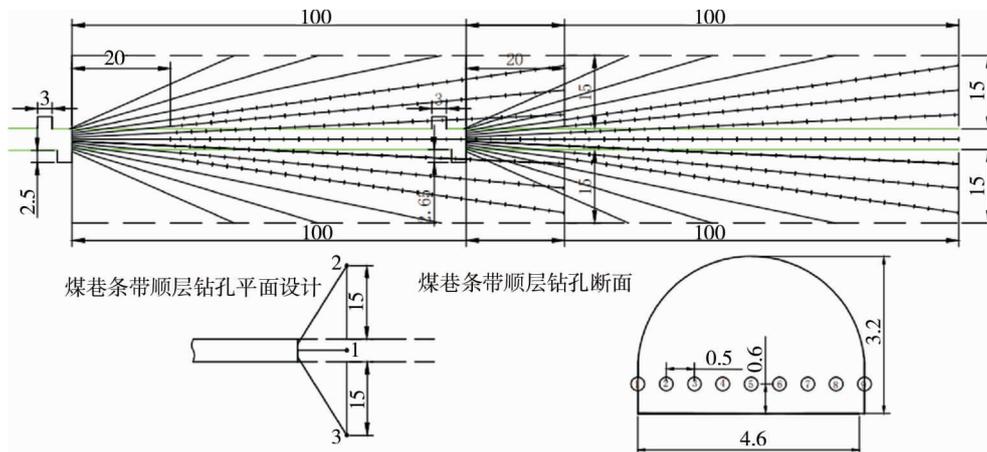


图 2 林华煤矿 9[#]煤层煤巷条带顺层长钻孔水力割缝钻孔设计(单位:m)

在对每组钻孔实施割缝、完成增透目的后,及时对各个割缝钻孔进行封孔操作,同时完成接抽工作,为了更好地对超高压水力割缝的现场试验成效进行分析,此次试验将对割缝排出的煤屑量(排屑量)、瓦斯的抽采浓度和抽采纯量进行考察分析.

2.3 工艺流程

本试验所用的割缝装置主要通过 3 阶段的工作流程进行割缝操作的:装置的准备与连接→装置的检查→割缝实施.整体装置根据图 1 所示结构进行顺序连接,在对各个结构和施工地点环境检查完毕后进行割缝施工,具体操作流程如图 3 所示.

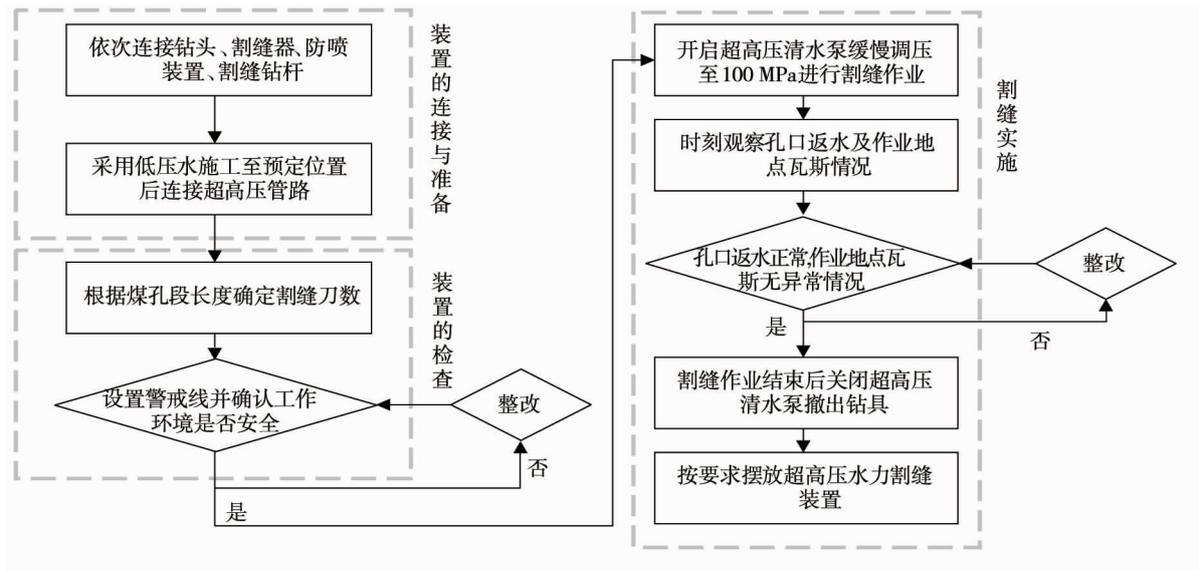


图 3 超高压水力割缝工艺

3 试验结果分析

3.1 割缝排屑量统计分析

试验利用超高压水力割缝技术,使割缝压力保持在 90~100 MPa,已测得本矿普通钻孔的排出煤屑量均值为 2.1 t,在对钻孔进行割缝过程中,普通钻孔的排出煤屑量均值和割缝钻孔 1#~9#排出的煤屑量记录如图 4 所示。

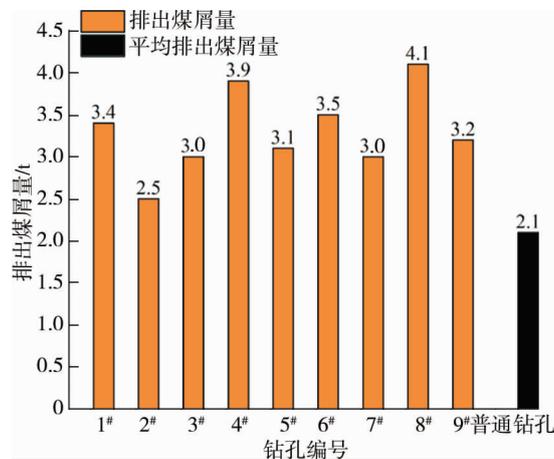


图 4 1#~9#割缝钻孔排出煤屑量

如图 4 所示,割缝后,9 个钻孔排出的煤屑量平均为 3.3 t,最高 4.1 t,最低 2.5 t,较普通钻孔的 2.1 t 均有所提升。

3.2 瓦斯抽采效果分析

本试验的最终目的是通过超高压水力割缝技术,解决煤巷条带煤层透气性较低的问题,这需要通过各种测量指标来反映,其中瓦斯抽采浓度、抽采纯量指标是最能直接反映煤层透气性、瓦斯抽采效率等关键问题的。因此,在本矿 9#煤层的煤巷条带区域范围内,对钻孔进行割缝和不割缝 2 种处理方式,并在 2 个月的试验期内统计钻孔 1#~9#的瓦斯抽采浓度、抽采纯量的数据变化,每 3 d 取一个值与普通钻孔进行对比,试验钻孔的测量结果如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可看出:割缝钻孔瓦斯抽采浓度(瓦斯抽采体积分数)最高为 81%、最低为 63%、平均 71.22%,普通钻孔最高为 57%、最低为 30%、平均 44.10%,因此可得,割缝钻孔平均日抽采浓度是普通钻孔的 1.61 倍。

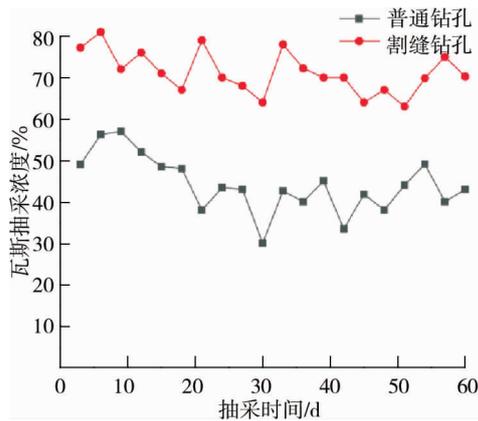


图5 瓦斯抽采浓度对比曲线

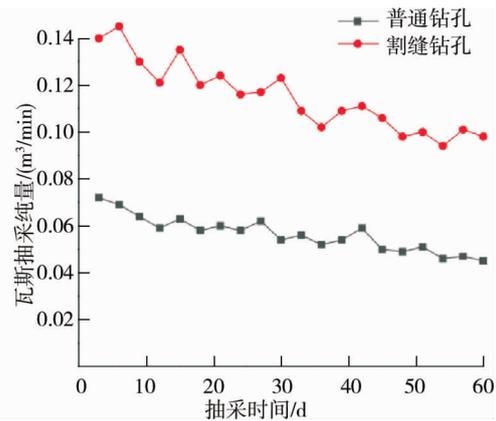


图6 瓦斯抽采纯量对比曲线

根据图6的对比情况,割缝钻孔瓦斯抽采纯量能达到的最高值是 $0.145 \text{ m}^3/\text{min}$,最低 $0.094 \text{ m}^3/\text{min}$,平均 $0.115 \text{ m}^3/\text{min}$,普通钻孔抽采纯量能达到的最高值是 $0.072 \text{ m}^3/\text{min}$,最低 $0.045 \text{ m}^3/\text{min}$,平均 $0.056 \text{ m}^3/\text{min}$,因此可得,割缝钻孔的平均日抽采纯量能够达到普通钻孔的2.04倍。

4 结论

1) 对于低透气性煤巷条带煤层掘进效率低的问题,通过超高压水力割缝技术,可有效解决开采过程中煤层增透难度大的问题,能够较大程度地提高煤层瓦斯抽采效率,降低抽采过程中的煤与瓦斯突出风险。

2) 在采用超高压水力割缝技术对本矿煤巷条带区域进行钻孔切割后,有效地提升了9#煤层的瓦斯抽采效率,割缝钻孔平均日抽采浓度是普通钻孔的1.61倍、抽采纯量达到了普通钻孔的2.04倍。

参考文献:

- [1] 韩真理. 贵州省煤与瓦斯突出特点及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(9): 50-54.
- [2] 张永将, 孟贤正, 季飞. 顺层长钻孔超高压水力割缝增透技术研究与应用[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(5): 1-5.
- [3] 杨慧明. 深部低透煤层水力割缝卸压增透技术研究现状及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2018, 49(6): 147-151.
- [4] 刘志伟, 赵金明, 张仰强, 等. 绿塘煤矿超高压水力割缝卸压增透效果考察及应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(1): 43-46.
- [5] 张永将, 陆占金. 超高压水力割缝煤层增透成套装置研制及应用[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 97-104.
- [6] 秦江涛, 陈婧, 谢文波, 等. 超高压水力割缝和 CO_2 相变致裂联合增透技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(9): 61-65.
- [7] 谢正红. 高压水力割缝增透技术及其应用[J]. 能源技术与管理, 2014, 39(4): 45-47.
- [8] 梁银权, 王进尚, 冯星宇. 高瓦斯低透气性煤层深钻孔高压水力割缝增透技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(6): 99-102.
- [9] 宋显锋. 超高压水力割缝技术在N1103胶带顺槽中的应用[J]. 现代矿业, 2018, 34(10): 214-216.
- [10] 张占国, 张锋. 超高压水力割缝技术在低渗透特厚煤层中的应用[J]. 能源与环保, 2018, 40(11): 90-93.
- [11] 郭君. 低透气性松软煤层高压水力割缝增透机理研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [12] 陈洪涛, 李太训. 薛湖煤矿超高压水力割缝工艺参数优化试验[J]. 工矿自动化, 2020, 46(1): 90-94.