

# 公路隧道突遇含瓦斯煤层的应急施工技术

徐至任<sup>1</sup>, 黄飞<sup>1,2,3\*</sup>, 李树清<sup>1,2</sup>, 龙港<sup>1</sup>, 刘勇<sup>3</sup>, 罗太友<sup>4</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南 焦作 454003;

4. 贵阳景烁安全科技有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:**为了解决公路隧道突遇含瓦斯煤层时的安全揭煤施工问题,针对鸡鸣隧道在实际掘进中比预计提前 390 m 遇见 M1 煤层的紧急状况,提出公路隧道突遇煤层的应急施工措施:首先,立即停止隧道内所有施工并加强通风;其次,及时对掌子面进行喷浆稳固围岩;最后,组织开展超前钻探,获取煤层产状和瓦斯参数,根据钻探数据制定防突措施并开展煤层消突处置。工程实践结果表明:(1) M1 煤层的真厚度约为 1.42 m,煤层倾角约为 70°,与隧道轴向的交角约为 88°;(2) M1 煤层与掌子面的最小法向距离为 2.60 m,根据提出的应急方案直接开展局部“四位一体”消突措施;(3) 局部消突措施检验达标后一次性顺利揭穿 M1 煤层。该方案为依托工程的安全揭煤提供了技术保障,并进一步完善了隧道揭煤防突的工作流程,可为同类型隧道揭煤施工提供参考。

**关键词:** 瓦斯隧道; 瓦斯含量; 应急措施; 隧道揭煤

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)01-0054-05

## Emergency Construction Technology of Highway Tunnel Encountering Gas Bearing Coal Seam

XU Zhiren<sup>1</sup>, HUANG Fei<sup>1,2,3\*</sup>, LI Shuqing<sup>1,2</sup>, LONG Gang<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>3</sup>, LUO Taiyou<sup>4</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disaster for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

4. Guiyang Jingshuo Safety Technology Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** In order to safely uncover coal seams when highway tunnels encounter gas bearing coal seams, and in view of the emergency construction situation when Jiming Tunnel meets M1 coal seams 390 m ahead of the design data during tunneling, emergency construction measures for highway tunnels that encounter coal seams are proposed. First, immediately stop all construction in the tunnel and strengthen ventilation; secondly, timely spray slurry on the face to stabilize the surrounding rock; then, organize advance drilling to obtain the coal seam occurrence and gas parameters. According to drilling data, outburst prevention measures shall be formulated and outburst elimination measures shall be carried out for coal seams. Results of engineering practice show that (1) The true thickness of the M1 coal seam is about 1.42 m, the dip angle of the coal seam is about 70°, and the intersection angle with the tunnel axis is about 88°. (2) The minimum normal distance between the M1 coal seam and the working face is 2.60 m. According to the proposed emergency measures, local “four in one” outburst elimination measures are directly carried out, and (3) after the inspection of local outburst elimination

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274198); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30252); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金资助项目(WS2021A02)

\* 通信作者, E-mail: fhuang@hnust.edu.cn

measures reaches the standard, the M1 coal seam is successfully exposed at one time. This technology provides a technical guarantee for the safety of coal uncovering relying on the project, and further improves the work process of coal uncovering and outburst prevention in tunnels, which can provide a reference for coal uncovering construction in the same type of tunnels.

**Keywords:** gas tunnel; gas content; emergency measure; tunnel coal uncovering

我国西南地区地形起伏较大,隧道施工难度大,导致这些地区存在交通不便的问题,相较于我国中、东部地区,西南地区经济建设严重落后.隧道施工是建设西部地区不可缺少的主要工程之一,虽然目前已取得一定的实践成果,但隧道的建设量远远低于需求量,主要原因是复杂的地质条件给隧道施工带来难度甚至危险,隧道穿越含瓦斯煤层又是众多危险中最具危险性的情形之一.

针对隧道穿越含瓦斯煤层的问题,杨正东<sup>[1]</sup>分析了瓦斯隧道施工情况及瓦斯隧道中煤层突出的原因,基于煤矿领域防治煤与瓦斯突出的经验,构建瓦斯隧道的防突技术;文献[2-3]确定了钻孔在掌子面中有效抽放半径与瓦斯抽采范围,对构造煤层中的抽放钻孔进行加密处理,使瓦斯抽采和区域防突效果显著;丁浩江等<sup>[4]</sup>在前期地质勘查及施工所揭示的地质情况基础上,对所经 10 层煤开展揭煤防突专项设计,防止煤与瓦斯突出,可为其他铁路隧道揭煤防突设计及施工提供参考;黄长国<sup>[5]</sup>提出一套新的隧道揭煤防突体系,以“区域防突措施先行,局部防突措施补充”为总体原则;肖乔等<sup>[6]</sup>建立系统自动监测与人工监测相结合的隧道瓦斯监测体系,根据实测数据对该隧道进行瓦斯防控效果分析,并给出相应的瓦斯超限处理措施;文献[7-8]按照“四位一体”的防突方针,进行超前探煤及煤与瓦斯突出危险性判定,进而采取有效的防突措施;韩光钦<sup>[9]</sup>分析隧道穿过区域的煤层及采空区分布情况,针对该区域潜在的瓦斯突出问题及采空区的坍塌问题,提出一种综合防护的施工方法,通过超前地质预报监测技术和超前钻孔探测技术预测瓦斯赋存地层,并对瓦斯含量实时监测,防止瓦斯积聚;陶云奇等<sup>[10]</sup>采用轻型定向钻机,以定向钻进和回转钻进相结合的工艺,对工作面中部常规穿层钻孔控制不到的空白区域,采取定向钻孔区域瓦斯治理措施,验证定向复合钻进工艺在煤与瓦斯突出煤层中的可行性;文献[11-12]提出采用定向复合钻进施工方法,通过沿斜向主孔中开放射状分支的布孔方式,控制工作面回采区域的瓦斯抽采,成功消除煤与瓦斯突出;吉力此且等<sup>[13]</sup>从瓦斯隧道施工技术方案、施工安全管理制度等方面,提出瓦斯人工监测与自动监测相结合的高瓦斯长大隧道施工中的安全技术和要点,为高瓦斯长大隧道提供了经验和方法;文献[14-15]提出采用瓦斯参数测定、瓦斯预先抽采、水力冲孔、煤层效果检验、煤层固化等瓦斯防治措施,顺利实现了安全揭煤.

隧道施工均是在有详细勘探资料的情况下按照计划进入煤系地层,依次开展超前钻探、区域防突、局部防突与揭煤施工.然而,在实际开挖隧道中,因隧道所在地质构造及地质岩性复杂、地质勘探范围有限等原因,经常出现煤层漏探的情况,导致隧道施工无预见性地进入瓦斯工区.对于此类瓦斯隧道施工问题,目前少有文献开展研究.鉴于此,本文以鸡鸣隧道为工程依托,有针对性地提出解决方案,并开展工程实践.

## 1 工程概况

### 1.1 隧道工程概况

鸡鸣隧道左洞桩号为 ZK59+706~ZK67+142.2,隧道全长 7 436.2 m,右洞桩号为 K59+692~K67+150,隧道全长 7 458 m.鸡鸣隧道围岩级别主要为Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级,其中Ⅲ级围岩长 2 595 m,Ⅳ级围岩长 9 392 m,Ⅴ级围岩长 2 900.2 m.隧道采用双向施工方案.截至隧道突遇 M1 煤层时,鸡鸣隧道出口右洞掌子面里程为 ZK64+873,隧道出口端洞身距地表最大埋深约 724 m,全段隧道最大埋深 1 130 m.鸡鸣隧道右洞洞身剖面图如图 1 所示.

### 1.2 隧道施工突遇瓦斯煤层

依据设计资料,进口端 K59+698—K61+745 为高瓦斯工区,K61+745—K63+200 为非瓦斯工区,出口端 K63+200—K67+150 为高瓦斯工区,出口端洞口的桩号为 K67+150,煤层为四层,主要为薄层状页岩夹煤层,可能存在高瓦斯.

隧道施工未进入瓦斯工区时,按照无瓦斯工区的步骤进行正常施工.当隧道出口端右洞施工至 K64+

873 位置(如图 1 所示)时,掌子面瓦斯自动传感器出现报警,瓦检员检测到孔内瓦斯浓度(瓦斯体积分数,全文同)达到 70%,钻孔返黑色煤屑且施工过程中有轻微喷孔现象,初步判定掌子面前方存在煤层.依据设计资料,预计 M1 煤层位置为 K64+483,此 M1 煤层位置比设计资料提前 390 m.当隧道施工突遇瓦斯煤层时,决定立即停工并加强通风.

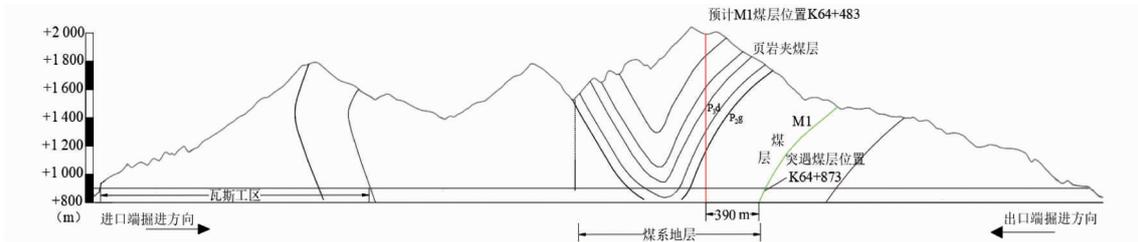


图 1 鸡鸣隧道右洞洞身剖面

## 2 工程实践

### 2.1 应急施工措施

根据突遇瓦斯煤层的情况,本文提出如图 2 所示的应急施工措施.根据该措施,当发现掌子面瓦斯浓度超限时,立即停止施工并加强通风,进行掌子面探煤的同时采取注浆及锚喷措施,以防止瓦斯溢出,接着进行钻屑瓦斯解吸指标( $K_1$ 值)和煤层参数测试,判定煤层是否具有突出危险性.当煤层厚度小于 0.3 m 时,采取瓦斯排放和一次或多次爆破的方法揭穿煤层;当煤层厚度大于 0.3 m、掌子面距离煤层的最小垂距大于 10 m 时,需先进行区域突出危险性预测,并且采取防突措施,制定揭煤方案,在瓦斯排放及检验完毕后方可揭煤;若煤层厚度大于或等于 0.3 m 且煤层与工作面最小垂距小于 5 m 时,即为突遇瓦斯煤层,应直接进行工作面突出危险性验证,并补充防突措施,实行防突效果检验后方可揭煤.

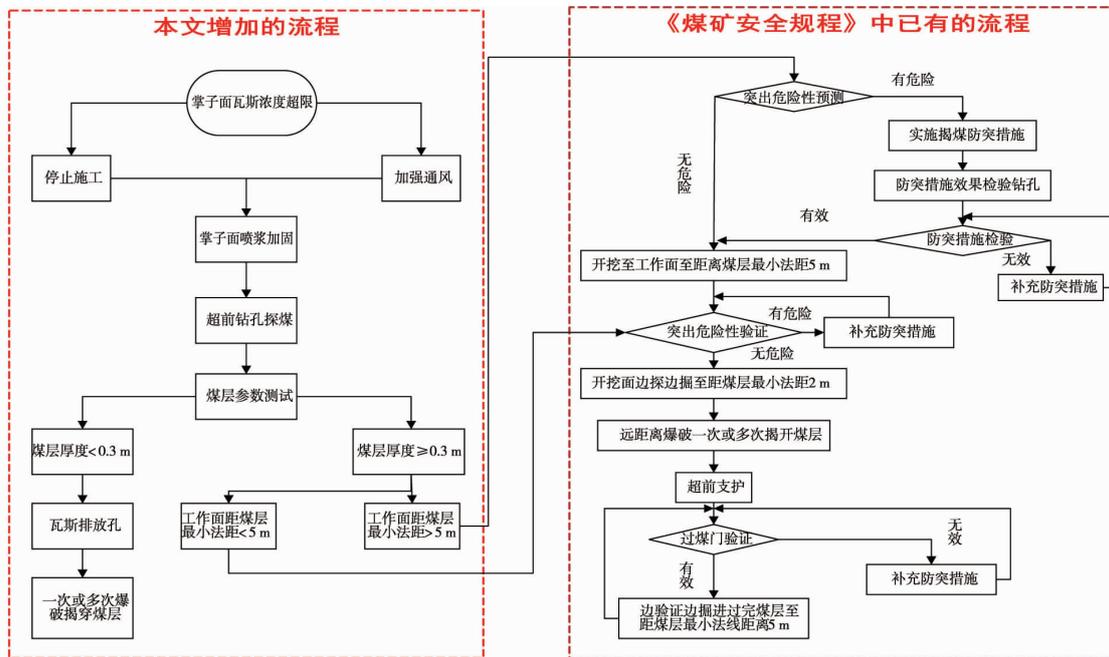


图 2 隧道施工突遇煤层应急施工技术流程

### 2.2 通风管理与掌子面固化

在鸡鸣隧道施工过程中,发现瓦斯浓度升高,经瓦检员勘测,钻孔内瓦斯浓度达到 70%,初步判定掌子面前方存在煤层.根据图 2 所示的流程,施工方当即决定停工,并且按照瓦斯工区的通风标准实施通风管理.首先将单风机单风筒改为双风机双风筒,目的是提高隧道洞内风速(风速不宜小于 1 m/s),增加隧道通风量.采用双风机的作用是确保有一套备用风机,当主风机出现故障,可切换至备用风机.双风机中的每个风机都应保证有两路电源,当一路电源因不可控原因发生断电时,另一电源需尽快接通,从而使双风机能够正常运行,保证持续通风.接着采用监控系统及传感器监测隧道洞内风量、风速、瓦斯浓度等.当因检查维修设备、停电等原

因导致隧道停风或者隧道瓦斯浓度超过1%时,应将电源切断同时工作人员安全撤离。

根据瓦斯隧道的通风要求,拟在鸡鸣隧道进口端分别设置2台185 kW、2台110 kW隧道施工用对旋式防爆轴流风机,一用一备,共计4台。主备通风机及配套设备用固定雨棚遮盖保护,防雨水腐蚀。主风机布置在距洞口30 m处,与轴线斜交30°,进风管口采用三通,2台风机共用一根风管。通风管采用 $\Phi 1.8$  m的抗静电、阻燃柔性风筒,按双管路布置。

在通风先行的情况下,同时进行掌子面固化喷浆。一是防止掌子面破碎的围岩发生二次破碎,二是对现有的瓦斯进行封阻,防止瓦斯溢出。

### 2.3 隧道超前探煤

在加强通风及掌子面喷浆加固后进行隧道超前探煤。通过超前钻孔探测前方确实存在煤层,在掌子面距预计煤层10 m处,施作探测孔5个(见图3:1号~5号),钻孔直径为75 mm,探测孔穿越煤层顶底板,获得煤层基本产状及参数:煤层与隧道相交夹角为88°,倾角为70°,煤层厚度为1.42 m,法向距离为2.62 m,如图3所示。

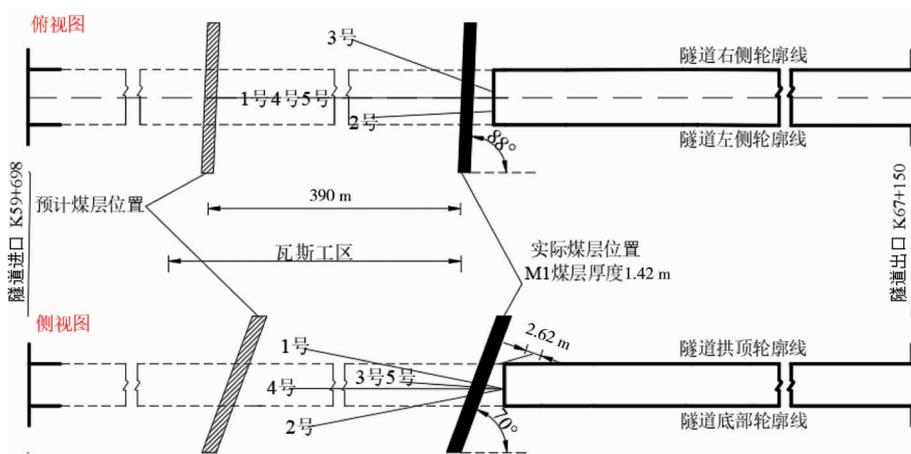


图3 M1煤层产状

通过超前探煤施作钻孔的方式进行瓦斯参数测定:相对瓦斯压力 $P_{\max} = 1.36 \text{ MPa} > 0.74 \text{ MPa}$ ,煤层瓦斯中烷烃气体含量 $W_{\max} = 8.56 \text{ m}^3/\text{t} > 8 \text{ m}^3/\text{t}$ ,煤的最高破坏类型为V类,煤的最小坚固系数 $f_{\min} = 0.1107 < 0.5000$ ,瓦斯放散初速度 $\Delta P_{\max} = 22 \text{ mmHg} > 10 \text{ mmHg}$ ,这5个鉴定指标均超过了临界值,按照《煤与瓦斯突出矿井鉴定规范》第五条判定:鸡鸣隧道煤层具有煤与瓦斯突出危险性。

### 2.4 隧道瓦斯排放

在判定煤层具有危险突出性的情况下,因为考虑煤层距工作面最小法距为2.6 m,小于5 m,煤层厚度大于0.3 m且煤层段埋深超过700 m,已超过区域防突措施范围,所以即刻进行工作面危险性验证。立即停止掘进,拆除已经装入爆破孔的炸药,进行喷浆加固及超前支护,同时加强地应力监测,防止因支护不及时或强度不足导致煤层大面积垮落,防止煤层突出或瓦斯超限事故发生,在持续通风的情况下采取瓦斯排放治理。

瓦斯排放能够降低隧道内瓦斯浓度,使掌子面围岩压力得以缓解,减少瓦斯喷孔,有效防止瓦斯突出。瓦斯排放前,洞内双风机附近的瓦斯浓度应小于0.5%,检查合格后可安全进行瓦斯排放;瓦斯排放时,洞内必须无人作业,电源为断开状态,在洞口立警示牌以防人员误入,并且加强洞内瓦斯监控监测,以掌握瓦斯涌出情况;瓦斯排放后,进行洞内瓦斯浓度检验,小于临界值后方可继续施工。

在M1煤层最小法向距离10 m位置设计施工瓦斯排放钻孔。鸡鸣隧道M1煤层掌子面开孔采用全断面布置,钻孔为13行、16列,共计208个,抽防孔水平角度数为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ ,仰角度数为 $0^\circ \sim 45^\circ$ ,俯角度数为 $0^\circ \sim 20^\circ$ ,共计4359.75 m工程量。钻孔布置如图4所示,其中第1排至第4排,间排距

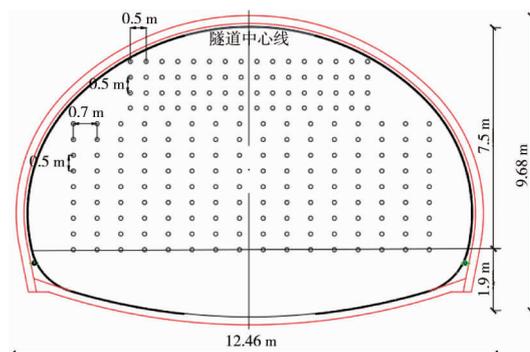


图4 瓦斯排放钻孔分布

为 0.5 m(孔间距)×0.5 m(排间距),第 5 排至第 13 排,间排距为 0.7 m(孔间距)×0.5 m(排间距)。

经瓦斯排放后,再次进行突出危险性验证,这里采用煤的残余瓦斯含量指标判定防突措施是否有效。

$$W_{cy} = \frac{W_0 G - Q}{G} \quad (1)$$

式中: $W_{cy}$ 为煤的残余瓦斯含量, $m^3/t$ ;  $W_0$ 为煤的原始瓦斯含量, $m^3/t$ ;  $Q$ 为单元钻孔抽排瓦斯总量, $m^3$ ;  $G$ 为单元参与计算煤炭储量,t。

经计算,鸡鸣隧道 M1 煤层经排放和抽放措施后残余瓦斯含量为  $7.5 m^3/t$ ,小于临界指标  $8 m^3/t$ ,又通过现场实测得到钻屑瓦斯解吸指标  $K_1 = 0.37 mL/(g \cdot min^{1/2})$ ,小于湿煤的临界值  $0.4 mL/(g \cdot min^{1/2})$ ,证明防突措施有效。

## 2.5 隧道煤层揭煤

瓦斯排放后进行工作面防突效果检验。检验钻孔设置于揭煤端面的两侧、上中下部,孔数不少于 5 个,使检验钻孔与各类钻孔均匀铺满整个端面,确保整个控制范围得到检验。当检验钻孔各指标都低于突出危险值时结束排放。待瓦斯浓度小于 0.3%、瓦斯压力达到安全值后,先进行超前支护,再采用远距离爆破揭开煤层。揭煤放炮前,切断洞内电源设备,全洞人员安全撤离,洞口杜绝一切火源,洞前设置安全警戒线,放炮地点设置在洞外。揭煤后,应急专业人员佩戴安全防护设备进入隧道掌子面,检验得到瓦斯浓度为 0.29%,瓦斯压力为 0.37 MPa。在确保安全且无任何异常现象的情况下,开启洞内电源,通风机工作 30 min 后,瓦检员再次进入隧道检验,当二氧化碳体积分数小于 1.5%时,方可进行洞内作业。

鸡鸣隧道在掘进施工过程中突遇含瓦斯煤层,经采用通风管理、掌子面固化、瓦斯排放、防突检验等措施后,达到了安全揭煤的目的。

## 3 结论

1)在现有瓦斯隧道揭煤防突技术的基础上,提出隧道施工突遇含瓦斯煤层的应急处置技术,主要包括紧急停工、加强通风、掌子面喷浆固化、超前钻探确定煤层分布产状以及煤层与掌子面的法向距离、开展煤层突出危险性鉴定、瓦斯抽排消突措施等技术流程。

2)所提出的应急技术成功应用于鸡鸣隧道突遇 M1 煤层的工程实践,顺利指导该隧道安全高效穿越具有突出危险的 M1 煤层。

3)该技术进一步完善和补充了瓦斯隧道揭煤防突技术流程,可为隧道施工突遇含瓦斯煤层提供可靠的技术保障。

## 参考文献:

- [1] 杨正东.贵州瓦斯隧道防突技术研究[J].煤炭工程,2018,50(12):4-8.
- [2] 龙港,黄飞,李树清,等.大断面公路隧道穿越构造煤层瓦斯抽放技术研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(S1):486-492.
- [3] 魏杰,吴世跃,王飞,等.突出煤层瓦斯抽采钻孔有效半径与孔壁变形关系研究[J].煤炭工程,2018,50(7):87-91.
- [4] 丁浩江,岳志勤,杨英,等.玉京山隧道“四位一体”揭煤防突施工技术[J].铁道工程学报,2018,35(6):47-53.
- [5] 黄长国.公路隧道揭煤防突技术及实践[J].地下空间与工程学报,2016,12(1):236-242.
- [6] 肖乔,胡杰,谭雷,等.成都地铁 11 号线暗挖隧道瓦斯监测体系设计与管理[J].煤炭技术,2020,39(7):91-93.
- [7] 张京亮,夏志杰.隧道穿越煤系地层施工技术及注意事项[J].云南水力发电,2020,36(7):20-25.
- [8] 武磊,徐文平,古兴龙,等.隧道煤层突出危险性预测方法的应用[J].煤炭技术,2016,35(2):181-183.
- [9] 韩光钦.煤系地层不良地质条件下隧道施工技术研究[J].公路,2016,61(1):234-237.
- [10] 陶云奇,路广奇,周正涛.煤与瓦斯突出煤层定向复合钻进技术研究[J].煤炭工程,2021,53(11):53-56.
- [11] 张建国,林柏泉,翟成.穿层钻孔高压旋转水射流割缝增透防突技术研究与应用[J].采矿与安全工程学报,2012,29(3):411-415.
- [12] 张英华,倪文,尹根成,等.穿层孔水压爆破法提高煤层透气性的研究[J].煤炭学报,2004,29(3):298-302.
- [13] 吉力此且,孙瑞雪.高瓦斯长大隧道施工中瓦斯防治技术与安全管理[J].四川建筑,2015,35(5):157-159.
- [14] 张许乐,卢建收.新安煤田高压水射流石门揭煤快速消突技术及应用[J].煤矿安全,2017,48(4):67-70.
- [15] 任仲久.水力冲孔技术在低透气性突出煤层瓦斯抽采中的应用[J].煤炭工程,2019,495(3):65-70.