

文章编号: 1674—8247(2021)01—0088—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.019

鹧子岩瓦斯突出隧道揭煤工程防突设计

旷文涛¹ 田卫东² 吴 伟¹ 曹林卫¹ 于茂春¹

(1. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023;
2. 重庆工程职业技术学院, 重庆 402260)

摘 要: 鹧子岩隧道于背斜核部、大断层附近连续六次穿过突出煤层, 煤层厚度大、间距小, 瓦斯压力大, 兼有地下水影响, 工程地质条件极其复杂, 且为穿越中梁山脉的第一座瓦斯突出隧道, 相关设计施工经验欠缺。本文以鹧子岩隧道为工程背景, 本着“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的指导思想, 在充分探明煤层地质特征的基础上, 系统制定了极复杂地质条件下瓦斯突出隧道揭煤防突的流程体系及工程措施。目前, 该流程体系及工程措施已成功应用于指导鹧子岩隧道揭煤防突作业, 可为类似地质条件的隧道揭煤防突作业提供指导, 同时有助于拓展和完善瓦斯突出隧道揭煤防突设计的理念和方法, 具有重要的工程实际意义。

关键词: 极复杂地质; 瓦斯突出隧道; 流程体系; 防突措施

中图分类号: U456.3 文献标志码: A

Outburst Prevention Design of Coal Mining in Yaoziyan Tunnel with Gas Outburst

KUANG Wentao¹ TIAN Weidong² WU Wei¹ CAO Linwei¹ YU Maochun¹

(1. CREEC (Chongqing) Survey, Design and Research Co., Ltd., Chongqing 400023, China;
2. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China)

Abstract: Yaoziyan Tunnel passes through outburst coal seams six times in succession near the anticline core and major faults, where the geological conditions are extremely complex for thick coal seams, short intervals, high-pressure gas and ground water. Moreover, because it is the first tunnel with gas outburst passing through Zhongliang Mountains, there is no sufficient experience in relevant design and construction. This paper takes Yaoziyan Tunnel as a case, logically formulates the system of procedure and engineering measures of coal mining and outburst prevention in tunnels with gas outburst under extremely complex geological conditions on the basis of fully studying the geological characteristics of coal seams, while adhering to the guideline of "regional outburst prevention measures shall be made first and local outburst prevention measures shall be taken as a supplement". This system is of important practical engineering significance, since it has been successfully applied to guiding the coal mining and outburst prevention for Yaoziyan Tunnel, and can provide guidance for the coal mining and outburst prevention of tunnels with similar geological conditions, and also help to expand and improve the concept and method of coal mining and outburst prevention design of tunnels with gas outburst.

Key words: extremely complex geological conditions; tunnel with gas outburst; system of procedure; outburst prevention measures

收稿日期: 2020-04-29

作者简介: 旷文涛 (1985-), 男, 高级工程师。

引文格式: 旷文涛, 田卫东, 吴伟, 等. 鹧子岩瓦斯突出隧道揭煤工程防突设计[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(1): 88-93.

KUANG Wentao, TIAN Weidong, WU Wei, et al. Outburst Prevention Design of Coal Mining in Yaoziyan Tunnel with Gas Outburst[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1): 88-93.

瓦斯突出隧道具有极高的安全风险,铁路工程选线时一般予以绕避,故上世纪 90 年代以前,铁路瓦斯突出隧道基本未见。随着我国经济的高速发展,从南昆铁路家竹箐隧道开始,瓦斯突出隧道越来越多,如沪昆高速铁路大茶山隧道、叙大铁路中坝隧道、渝贵铁路新凉风垭及天坪隧道、成贵客运专线玉京山隧道等均为瓦斯突出隧道。

瓦斯突出隧道发生煤与瓦斯突出的风险极高,其修建成败的关键在于对突出煤层的处理。早期的瓦斯突出隧道(如家竹箐隧道、中坝隧道、大茶山隧道),基本采用短兵相接的局部防突措施,一旦局部防突措施失效,易发生瓦斯突出事故,甚至是群死群伤的重大事故。近年来,结合煤炭系统揭煤防突技术的发展,铁路隧道揭煤防突技术及相关规范亦逐渐趋于成熟。《煤矿安全规程》(2016 版)、《防治煤与瓦斯突出细则》(2019 版)、TB 10120-2019《铁路瓦斯隧道技术规范》等规范相继颁布,“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的揭煤防突理念已成为工程界的普遍共识。近年修建的天坪隧道^[1]、新凉风垭隧道^[2]及玉京山隧道^[3]均采用了区域及局部综合防突措施。

虽然目前已有不少瓦斯突出隧道的成功案例,但像鸽子岩隧道这样同时于背斜核部、大断层附近连续 6 次穿过突出煤层的情况还前所未见。且鸽子岩隧道为穿越中梁山的第一座瓦斯突出隧道,相关设计施工经验欠缺。鉴于此,本文以鸽子岩隧道极复杂地质构造突出煤层揭煤防突设计为工程背景,以“区域防突措施为主、局部防突措施补充”^[4]为指导思想,在充分探明煤层、瓦斯及构造等地质特征的基础上,系统制定了极复杂地质突出煤层揭煤防突的流程体系和工程措施,指导鸽子岩隧道的揭煤防突施工。

1 工程背景

1.1 工程概况

重庆铁路枢纽东环线鸽子岩隧道位于重庆市北碚区,为时速 160 km 的双线隧道;隧道正穿重庆中梁山脉,最大埋深 330 m,全长 4 782 m。洞身中部分布约 2 800 m可溶岩,同时受环境保护区边界及线路接线高程控制,洞身于观音峡背斜核部、白庙子逆断层附近穿越二叠系龙潭组突出煤层,连续 6 次揭煤,地质条件十分复杂^[5]。根据勘察成果资料,K8 煤层测试数据中,仅有放散初速度未达到突出指标,其他 3 个参数均达到突出指标。隧道附近煤矿 K2、K6-2 煤层的勘测资料显示,煤层测试数据的放散初速度都未达到突出指标,但在开采过程中仍发生多次突出事故;邻近含相同

煤层的磨心坡煤矿资料显示,该煤矿在 1960~1998 年期间共发生多达 27 次瓦斯突出事故,突出最大瓦斯涌出量达 10 万方,为煤与瓦斯突出矿井。因此,综合判定鸽子岩隧道穿越龙潭组煤系地层段具煤与瓦斯突出危险,为瓦斯突出隧道,按 I 级风险隧道进行管理。同时结合工期、排水、通风需要,隧道出口段线路右侧 35 m位置设置无轨运输平导,突出煤层段平导为单车道。

施工过程中,根据综合超前地质预报及煤层参数补充测试成果,对突出煤层段地质特征进行修正,煤层段地质纵断面如图 1 所示。煤层相关参数如表 1 所示。

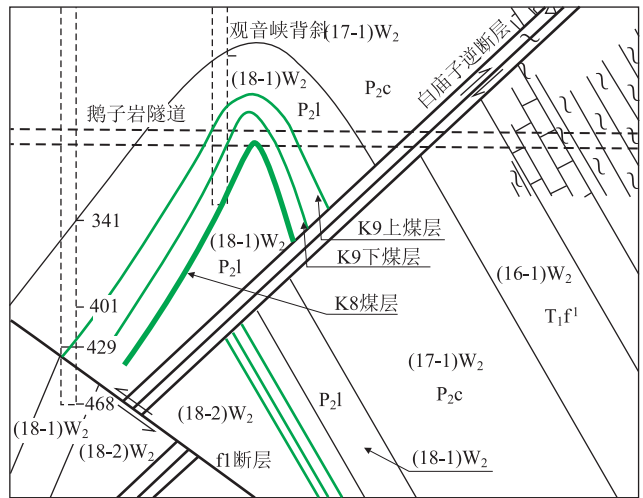


图 1 突出煤层段地质纵断面示意图

表 1 突出煤层特征参数表

煤层编号	K8	K9 下	K9 上
煤层描述	龙潭组三段中部焦煤,俗称双连子	龙潭组三段上部焦煤,俗称背连	俗称小独连,位于龙潭组三段上部
瓦斯放散初速度 Δp	18	9	9
煤层瓦斯压力/MPa	1.6	1.4	1.4
煤层坚固系数 f	0.16	0.29	0.24
煤的破坏类型	Ⅳ类	Ⅳ类	Ⅳ类
煤层厚度/m	4.05	0.51	0.45
吨煤瓦斯含量/(m^3/t)	16.32	14.54	13.8
透气性系数/[$\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$]	0.03~0.05	0.04~0.09	0.04~0.09

1.2 地质特征

根据探明的地质资料,突出煤层段具有以下区域地质特征。

(1) 构造复杂

隧道及平导分别在 DK 153+290、PDK 153+310 处与观音峡背斜核部正交,地表核部为飞仙关组一段灰岩、白云岩地层,隧道穿越范围核部为二叠系龙潭组页岩夹煤层。背斜轴部受构造作用,岩体较破碎。

隧道正穿白庙子逆断层,下覆F1断层。白庙子逆断层与隧道及平导大角度交于DK 153 + 400和PDK 153 + 420附近,夹角约75°。白庙子逆断层切断观音峡背斜北西翼,使背斜东翼及其核部地层整体抬升,导致地表飞仙关组第二段紫红色泥岩直接覆于飞仙关第三段灰岩地层之上,且飞仙关三段灰岩地层的出露厚度急剧减小。钻探揭示断层破碎带宽约32 m。下覆F1断层使煤层区域地质特征更为复杂,超前地质预报揭示,煤层段岩层破碎,完整性较差。

(2)地下水发育

煤层上部为厚层灰岩,背斜范围构造作用下,岩体较破碎,同时因断层切割地层,地下水发育,隧道施工受地下水影响较大。

(3)瓦斯突出风险极高

瓦斯含量高,压力大,实测最大瓦斯压力为1.6 MPa,最大瓦斯含量达30.7 m³/t。煤层透气系数低,各层煤均较难抽采。超前地质预报过程中,瓦斯连续数月喷气、喷水,瓦斯动力现象十分明显,瓦斯突出风险极高。

(4)煤层相互影响大

隧道连续6次揭煤,其中K8煤层厚度达3.5 m,各煤层间最大间距13.5 m,最小间距8.2 m,煤层之间相互影响极大,防突处理难度大。

1.3 工程地质条件评价

鸽子岩隧道煤层特征工程类比如表2所示。

表2 突出煤层特征工程类比如表

项目	最大瓦斯压力/MPa	连续煤层数及段落长度	构造情况
重庆枢纽东环线鸽子岩	1.6	6层煤,65 m	位于背斜核部,邻近白庙子逆断层,下覆F1断层
渝黔铁路天坪	1.34	5层煤,46 m	无
渝黔铁路凉风垭	1.3	5层煤,46 m	无
南昆家竹箐隧道	1.585	1层,10.7 m	无
叙大线中坝隧道	0.78	1层,4.2 m	无
成贵玉京山隧道	1.43	1层,3.24 m	无

鸽子岩隧道同时于背斜核部、大断层附近连续6次穿过突出煤层的情况前所未见,煤层范围地质构造极其复杂,同时瓦斯压力大,小间距连续煤层分布段落长达65 m。鉴于鸽子岩隧道的地质特征,为确保工程安全,应对其揭煤工程防突进行系统研究。

2 防突流程体系

2.1 编制原则

(1)揭煤防突实施前,应建立并实施多方位的瓦

斯突出安全保障体系;

(2)突出煤层段地质条件复杂,为避免瓦斯沿构造,尤其是断层带逸出引起瓦斯喷出,同时也为避免误揭煤层,隧道施工至断层及煤层50 m位置时,应提前实施超长距离综合超前地质预报,基本探明煤层、瓦斯及构造特征。

(3)鉴于煤层间距小,构造复杂,为确保施工安全,将背斜核部范围煤层视为整体煤层考虑。

(4)贯彻“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的防突原则,工作面防突措施设计为预案措施,在区域验证防突措施无效的情况下,启动工作面防突措施预案。

(5)针对鸽子岩隧道极复杂地质条件下近距离连续多次穿越突出煤层的实际情况,根据区域综合防突理念,首先以突出煤层段作为整体,一次性实施超前地质预报、区域突出危险性预测、区域防突措施及效果检验,然后分煤层循环进行区域验证和局部综合防突。

2.2 流程体系

鸽子岩隧道揭煤防突体系如图2所示。

施工图阶段基于该流程体系对各流程进行了针对性设计。在施工过程中,结合瓦斯规范变化及现场施工情况,增大了瓦斯区域抽放控制范围,启动了水力压力增透预案。

3 防突措施

3.1 安全保障体系

根据瓦斯突出工区安全要求,建立可靠的安全保障体系,包括通风系统、供电系统、防爆运输、安全监测、人员定位、紧急避险、压风自救、供水施救和通讯联络系统。

3.2 长距离综合超前地质预报

隧道施工至断层及煤层50 m位置时,提前实施长距离综合超前地质预报,基本探明煤层、瓦斯及构造特征,相关技术要求如下:

(1)分别于距离断层50 m、20 m以及距离煤层50 m位置,分3次实施长距离综合超前地质预报,实施里程分别为DK 153 + 480、DK 153 + 460和DK 153 + 385,每次搭接长度不小于10 m,如图3所示。

(2)前两环穿越断层段钻孔与煤层底板交点应控制在开挖轮廓线外5 m范围内;最后一环应穿透所有煤层,穿越煤层段钻孔与煤层底板交点应控制在开挖轮廓线外10 m范围内,并确保能在开挖面距煤层前20 m以上位置时基本查明煤层特征。

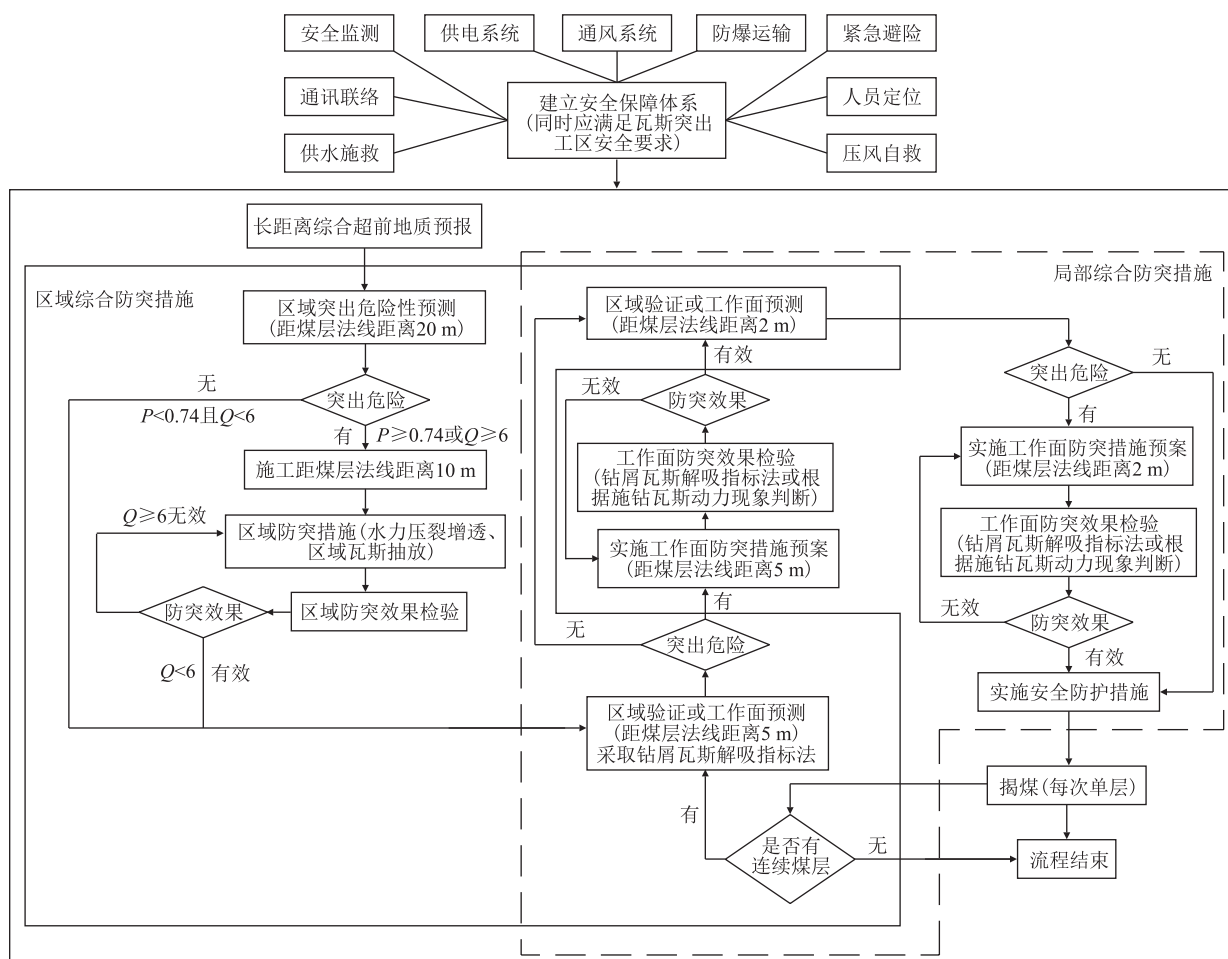


图2 鸚子岩隧道揭煤防突流程体系图

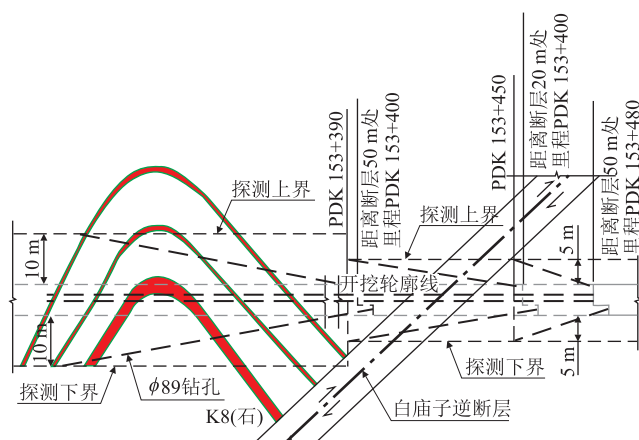


图3 长距离超前地质预报示意图

(3)超前钻孔直径为 $\phi 89$,平导布置 5 孔,正洞布置 7 孔,其中均不少于 1 孔取芯。

3.3 区域综合防突措施

(1) 区域突出危险性预测

在距离煤层(法线距离)20 m时,一次性穿透所有煤层实施区域预测,采用 $\phi 89$ 钻孔。考虑到地质复

杂,煤层较多,预测孔在规范不少于3孔基础上有所增加,平导上台阶布置4孔,下台阶1孔,正洞上台阶布置4孔,下台阶2孔。预测孔需取芯,进入煤层底(顶)板岩层不小于0.5 m。

采用瓦斯压力 P 及吨煤瓦斯含量 W 作为瓦斯突出危险性预测指标,瓦斯压力小于 0.74 MPa 且瓦斯含量小于 $6 \text{ m}^3/\text{t}$ 时无突出危险,否则具有突出危险。超前地质预报显示瓦斯动力现象十分明显,K8、K9 上、K9 下煤均具有瓦斯突出危险。

(2) 区域防突措施

区域各层煤均较难抽放,为缩短抽放时间、提高瓦斯抽放效果。首先于区域预测断面位置对 K8、K9 煤层采用水力压裂增透处理。

煤层增透处理后,继续施工至距煤层法向距离 10 m 处,实施区域瓦斯抽放钻孔施工,一次性穿过所有煤层实施区域瓦斯抽放。该段煤层处于背斜核部,地质条件复杂:一是拱顶若发生掉块、局部坍塌或片帮等,易造成瓦斯突出,危险性较大;二是隧底 2 个预测

孔喷孔严重,截止瓦斯抽放前,喷孔时间已超过40 d,煤层瓦斯喷孔情况严重。结合现场实际情况及瓦规相关规定,为保证施工安全,将瓦斯区域抽放范围在施工图基础上适当加大,确定为隧道开挖轮廓线外顺煤层层理方向上下各20 m、左右各15 m,各抽放孔在煤层1/2厚度处的孔距不应大于4 m,抽放孔进入煤层底(顶)板岩层不小于0.5 m。水力压裂及区域抽放均采用 $\phi 89$ 钻孔。

(3) 区域措施效果检验

瓦斯抽放措施实施后,一次性穿透所有煤层实施区域效果检验,以确认煤层瓦斯抽放效果。当残余吨煤瓦斯含量小于 $6\text{ m}^3/\text{t}$ 时,认为防突措施有效,否则认为无效,采取延长排放时间、增加抽放孔数量、继续瓦斯抽放等补救措施,直至判定区域防突措施有效为止。考虑到地质复杂,煤层较多,检验孔较规范4孔有所增加,平导布置12孔,正洞布置17孔,距预抽区域边缘不大于2 m处不少于1孔。检验孔也采用 $\phi 89$ 钻孔。

(4) 区域验证

区域防突措施效果检验有效后,继续施工至距煤层底(顶)板5 m和2 m垂距时,分煤层循环进行区域验证。

区域验证采用钻屑瓦斯解吸指标法,采用 $\phi 89$ 钻孔,钻孔数在规范3孔基础上有所增加,平导布置4孔,其中下台阶布置1孔。正洞布置6孔,其中下台阶布置2孔。

3.4 局部综合防突措施

工作面防突措施分煤层循环进行,包括工作面预测、工作面防突措施、工作面措施效果检验及实施安全防护措施。根据“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的防突工作原则,在区域防突措施失效的情况下,启动工作面防突措施。

揭煤前应实施安全保护措施,包括再次核查相关安全保障体系实施到位、已开挖段落实施完成系统支护及钢架、提前实施大管棚或小导管超前支护、针对揭煤作业风险编制相应的预案措施等。

3.5 防突措施实施效果

(1)长距离超前地质预报预测表明,断层范围无瓦斯突出危险,背斜范围煤层均具瓦斯突出危险。

(2)平导、正洞共设置钻孔约750孔,总长约40 000 m,瓦斯抽采方量共约20万方,抽放时间约3个月。

(3)抽放后吨煤瓦斯含量均小于 $6\text{ m}^3/\text{t}$,区域防

突措施效果明显。

(4)揭煤施工过程中,分煤层区域验证均无瓦斯突出危险,未启动工作面防突措施。

(5)平导于2020年4月揭煤完成。截止2020年7月底,正洞揭煤已基本完成。

鸽子岩隧道揭煤工程的顺利实施,表明鸽子岩隧道揭煤防突流程体系及工程措施可用于指导极复杂地质的突出煤层施工。

4 结论及建议

4.1 结论

鸽子岩隧道于背斜核部、大断层附近连续6次穿过突出煤层,同时煤层厚度大、间距小,瓦斯压力大,兼有地下水影响,工程地质条件极其复杂。且该隧道为穿越中梁山脉的第一座瓦斯突出隧道,相关设计施工经验欠缺。为确保施工安全,制定了系统的安全保障体系,采用了长距离综合超前地质预报,区域瓦斯抽放前提前实施水力压裂增透,制定了“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的防突体系,首先以背斜核部小净距突出煤层作为整体,一次性穿透所有煤层实施区域突出危险性预测、区域防突措施及效果检验,然后分煤层循环进行区域验证、局部综合防突措施及揭煤作业。

本文以穿越中梁山脉的首座瓦斯突出隧道揭煤防突为工程背景,本着“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的指导思想,在充分探明煤层地质特征的基础上,系统制定复杂地质突出煤层揭煤防突流程体系及工程措施,成功指导了鸽子岩隧道的揭煤防突作业,可为类似地质条件的隧道揭煤防突作业提供指导,同时有助于拓展和完善瓦斯突出隧道揭煤防突设计的理念和方法,具有重要的工程实际意义。

4.2 建议

(1)鸽子岩隧道突出煤层施工过程中,瓦斯动力现象十分明显,喷孔十分严重,突出风险极高。鉴于瓦斯突出隧道的极高风险,工程选线应尽量绕避。

(2)为确保施工安全,瓦斯突出隧道应严格执行“区域防突措施先行、局部防突措施补充”的防突工作原则。

(3)应将间距较小、构造复杂的多层煤视为整体,纳入一次性超前地质预报及区域防突措施控制范围,这对提高施工效率、确保施工安全效果明显。

(4)水力压裂增透可有效提高瓦斯抽放效果,大大缩短抽放时间,应结合工程实际合理选用。

参考文献:

[1] 田卫东. 天坪隧道横洞工区正洞及平导揭煤防突技术[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(4): 82–86.
TIAN Weidong. Technology of Uncovering Coal and Outburst Prevention in Hengdong Work Area of Tianping Tunnel[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(4): 82–86.

[2] 朱艳峰, 张雪松, 黄明普. 新凉风垭隧道煤系地层段施工关键技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(9): 1967–1973.
ZHU Yanfeng, ZHANG Xuesong, HUANG Mingpu. Study on the Key Construction Technology of New Liangfenya in Coal Measure Strata [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1967–1973.

[3] 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.

DING Haojiang, YUE Zhiqin, YANG Ying, et al. “Four-in-one” Outburst Prevention Construction Technology for Uncovering Coal of Yujingshan Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(6): 47–53.

[4] 煤安监技装[2019]28 号,防治煤与瓦斯突出细则[S].
Mei An Jian Ji Zhuang[2019] No. 28, Rules for Prevention of Coal and Gas Outburst[S].

[5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新建重庆铁路枢纽东环线鸽子岩隧道施工图设计[R]. 成都 : 中铁二院工程集团有限责任公司,2017.
China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. Detail Design of Yaoziyan Tunnel in the East Ring Road of Newly-built Chongqing Railway Hub [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co. , Ltd. ,2017.



(上接第 49 页)

(3)综合结构位移及内力分析,新平隧道软弱围岩段建议采用工况 4 的台阶高度进行施工。

参考文献:

[1] 崔庆龙, 郑少华, 高抗. 不同开挖方法对软弱围岩隧道影响模拟研究[J]. 交通科技, 2017,(05): 86–89.
CUI Qinglong, ZHENG Shaohua, GAO Kang. Numerical Simulation for Influence of Different Excavation Methods on the Soft Rock Tunnel [J]. Transportation Science & Technology, 2017 (5): 86–89.

[2] 贾晓旭, 赵玉成. 软弱围岩隧道 CD 法和台阶法施工力学行为分析[J]. 铁道标准设计, 2016,60(7): 121–125.
JIA Xiaoxu, ZHAO Yucheng. Analysis of Mechanical Behavior of Tunneling in Weak Surrounding Rock by CD Method and Benchng Method[J]. Railway Standard Design, 2016,60(7): 121–125.

[3] 李建华, 邓涛, 刘大刚, 等. 下台阶含仰拱一次开挖工法仰拱早期受力研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018,38(7): 1115–1122.
LI Jianhua, DENG Tao, LIU Dagang, et al. Study of Early Stress Form of Inverted Arch when Simultaneously Excavated with Lower Bench[J]. Tunnel Construction, 2018,38(7): 1115–1122.

[4] 蔡闽金, 刘大刚, 邓涛, 等. 下台阶含仰拱一次开挖工法特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018,15(3): 727–733.
CAI Minjin, LIU Dagang, DENG Tao, et al. A Study on Characteristics of Simultaneous Excavation Method of Lower Bench and Inverted Arch[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018,15(3): 727–733.

[5] 李文江, 孙明磊, 朱永全, 等. 软弱围岩隧道台阶法施工中拱脚稳定性及其控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(S1): 2729–2737.
LI Wenjiang, SUN Minglei, ZHU Yongquan, et al. Arch Springing Stability and Its Control Techniques during Construction of Tunnels

with Weak Surrounding Rocks by Bench Cut Method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(S1): 2729–2737.

[6] 关宝树. 软弱围岩隧道变形及其控制技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 1–17.
GUAN Baoshu. Deformation of Tunnels with Soft Surrounding Rocks and Its Control[J]. Tunnel Construction, 2011,31(1): 1–17.

[7] 刘招伟, 李建华. 台阶法(带仰拱)一次开挖施工技术在软岩隧道中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018,38(2): 287–294.
LIU ZhaoWei, LI Jianhua. Application of One-Time Excavation Method of Bench and Inverted Arch to Soft Rock Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018,38(2): 287–294.

[8] 崔光耀, 祁家所, 王明胜. 片理化玄武岩隧道围岩大变形控制现场试验研究[J]. 岩土力学, 2018,39(S2): 231–237.
CUI Guangyao, QI Jiasuo, WANG Mingsheng. Field Test Study on Large Deformation Control of Surrounding Rock of Cleaved Basalt Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(S2): 231–237.

[9] 崔光耀, 王道远, 倪嵩陟, 等. 软弱围岩隧道钢纤维混凝土衬砌承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017,39(10): 1807–1813.
CUI Guangyao, WANG Daoyuan, NI Songzhi, et al. Model Tests on Bearing Characteristics of Steel Fiber-Reinforced Concrete Lining of Weak Surrounding Rock Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017,39(10) 1807–1813.

[10] 赵勇, 刘建友, 田四明. 深埋隧道软弱围岩支护体系受力特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(8): 1663–1670.
ZHAO Yong, LIU Jianyou, TIAN Siming. Experimental Study of Mechanical Characteristics of Support System for Weak Surrounding Rock of Deep Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(8): 1663–1670.

[11] TB 10003–2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003–2016 Code for Design of Railway Tunnel. [S].