

马强,邹智波,黄飞,等.大断面隧道揭急倾斜突出煤层临界安全岩柱厚度[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):7-12. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.002

MA Q, ZOU Z B, HUANG F, et al. Critical Safety Rock Pillar Thickness of Large Cross Section Tunnel Excavating Steeply Inclined and Outburst Coal Seam[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2):7-12. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.002

# 大断面隧道揭急倾斜突出煤层 临界安全岩柱厚度

马强<sup>1</sup>, 邹智波<sup>2</sup>, 黄飞<sup>3\*</sup>, 李树清<sup>3</sup>

(1. 贵州高速公路集团有限公司, 贵州 贵阳 550001; 2. 浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 310000;  
3. 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)

**摘要:** 为了降低公路隧道大断面石门揭煤的施工风险, 以松坎隧道穿越急倾斜煤层施工为工程依托, 采用理论手段估算了安全岩柱的厚度, 并结合工程现场分析了开挖过程中的围岩破坏特征, 从塑性变形与应力分布 2 个角度提出了对应的岩石破坏判据. 采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立了隧道穿越急倾斜煤层施工的三维模型, 对比分析了掌子面前方距煤层不同位置的塑性破坏特征与应力分布规律. 根据研究结果并充分考虑隧道现场情况, 最终选择 9 m 作为松坎隧道穿越急倾斜突出煤层施工的安全岩柱厚度.

**关键词:** 瓦斯隧道; 急倾斜突出煤层; 安全岩柱; 塑性破坏; 应力变化

**中图分类号:** U455.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2021)02-0007-06

## Critical Safety Rock Pillar Thickness of Large Cross Section Tunnel Excavating Steeply Inclined and Outburst Coal Seam

MA Qiang<sup>1</sup>, ZOU Zhibo<sup>2</sup>, HUANG Fei<sup>3</sup>, LI Shuqing<sup>3</sup>

(1. Guizhou Expressway Group Co., Ltd., Guiyang 550001, China;

2. Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

3. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to reduce the construction risk of uncovering coal at large cross-sections of highway tunnels, based on the construction of Songkan tunnel crossing steep coal seam, the thickness of safety rock pillar was estimated by theoretical means, and the failure characteristics of surrounding rock in the excavation process combination with the engineering site. Corresponding rock failure criteria were proposed from the perspectives of plastic deformation and stress distribution. The three-dimensional model of tunnel construction through steeply inclined coal seam was established by using FLAC<sup>3D</sup> software, and the plastic failure characteristics and stress distribution law at different positions in front of the face of the tunnel were compared and analyzed. Research results show that the value of safe rock pillar should not be less than 9 meters for construction of Songkan tunnel

收稿日期: 2021-01-22

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目优秀青年项目资助(19B201); 浙江省建筑业技术创新协会 2018 年科研项目一般项目资助(2018B02)

\* 通信作者, E-mail: fhuang@hnust.edu.cn

crossing steep inclined outburst coal seam.

**Keywords:** gas tunnel; steeply inclined outburst coal seam; safe rock pillar; plastic failure; stress change

随着近些年云贵川地区交通建设的不断加大,隧道施工中经常会穿过煤系地层,给隧道施工增加了风险,其中,大断面隧道穿越急倾斜高瓦斯突出煤层群的施工极易造成煤与瓦斯突出、隧道塌方等灾害问题.按照《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》(JTG/T 3374—2020)等的规定,该类隧道在揭煤施工前必须在距离煤层一定垂距处进行瓦斯抽排处理,待指标达标后才能进行揭煤施工,该垂距定义为隧道揭煤临界安全岩柱.

目前,许多学者对临界安全岩柱厚度进行了研究.郭佳奇等<sup>[1-2]</sup>综合考虑各种影响因素,建立了各自对应的岩柱安全厚度力学预测模型;张骞等<sup>[3]</sup>采用数值仿真分析了隧道穿越破碎带时,不同岩层倾角、隧道埋深等因素对掌子面岩板最小安全厚度的影响;周蔚文等<sup>[4]</sup>通过正交试验分别研究了断层倾角、断层宽度、隧道处水压、隧道直径4个因子对防突安全厚度的影响;陈凌云<sup>[5]</sup>研究了安全岩柱破坏的影响因素和机理,利用FLAC<sup>3D</sup>软件模拟得出了华蓥山隧道西端安全岩柱的厚度;龚兵文等<sup>[6]</sup>根据应力演化规律定义了预测距离和安全保障距离,提出了完整的预测体系,指导了现场施工;赵晨等<sup>[7]</sup>通过对采空区承压水对安全岩柱的影响和工作面矿压规律的分析,得出了安全岩柱稳定性的评价计算方法;姚海波等<sup>[8]</sup>则采用数值模拟对破碎带油气田隧道的安全岩柱厚度进行分析,获得了开挖后围岩中应力重新分布的区域范围,由此得出了安全厚度;彭宇峰等<sup>[9-13]</sup>结合不同工况的工程背景对相应的瓦斯隧道消突方案进行了优化,提出了一系列的揭煤安全岩柱厚度确定方法.

综上所述,现有文献对隧道揭煤安全岩柱厚度的研究主要集中在较为常规的隧道揭煤施工中,而少有文献考虑隧道大断面的尺寸效应和急倾斜突出煤层的影响.本文以松坎隧道为工程背景,拟对大断面隧道揭急倾斜突出煤层施工的临界安全岩柱厚度开展探讨.

## 1 工程概况

松坎隧道位于桐梓县尧龙山镇、松坎镇境内.该隧道设计为分离式特长隧道,隧道衬砌内轮廓采用三心圆,内轮廓设计高程局拱顶高度7.94 m,净宽15.618 m,左右幅均为单向坡,纵坡坡率为-2.3%.左线起讫桩号为ZK4+955~ZK8+077,长3 122 m,右线起讫桩号为YK4+926~YK8+020,长3 094 m.其中,左线在ZK6+400~ZK6+530、右线在YK6+390~YK6+520处穿越4层煤,编号依次为M1~M4,煤系地层总长约130 m.根据现场钻孔勘探数据显示:煤层倾角约为74°,属于急倾斜煤层群,煤层走向与隧道轴向的夹角为45°.隧道轴向与煤层分布情况如图1所示.

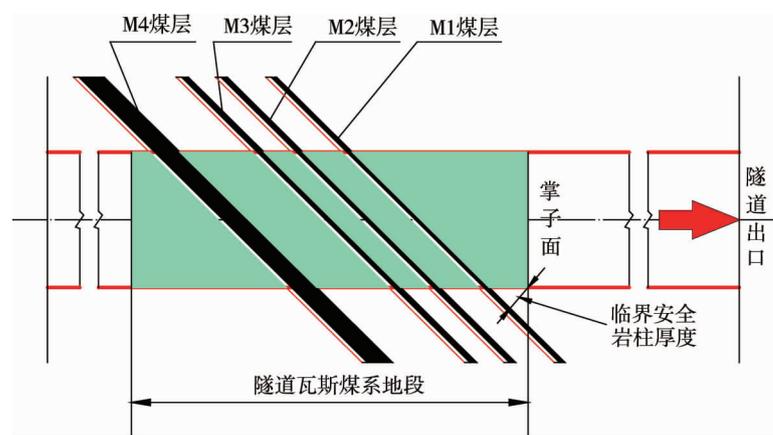


图1 隧道轴向与煤层分布情况

通过隧道掌子面钻孔取芯勘探方式进行煤层瓦斯参数测试,结果显示:煤层瓦斯含量在8.10~25.72 m<sup>3</sup>/t,大于突出煤层临界瓦斯含量8 m<sup>3</sup>/t;煤层瓦斯压力为2.63 MPa,大于突出煤层临界瓦斯压力0.74 MPa,放散初速度为27 mmHg,大于突出煤层临界放散初速度10 mmHg.根据《公路瓦斯隧道设计与施工技术规范》(JTG/T 3374—2020)等的规定,该隧道设计为高瓦斯突出煤层隧道,需进行瓦斯抽采等防突处理.

## 2 临界安全岩柱厚度理论计算

根据松坎隧道的工程概况,当隧道掌子面推进到如图1所示的位置后必须进行瓦斯抽排处理.根据图

1, 掌子面左下方与 M1 煤层的垂直距离即为临界安全岩柱厚度. 由于现场实际安全岩柱的影响因素及相互作用关系较为复杂, 岩柱的理论计算仍然不够完善与系统化. 目前, 相关学者根据现场经验在改进验证基础上提出了 2 种理论计算估算方法<sup>[14]</sup>.

### 2.1 止浆岩盘改进法

第 1 种理论估算方法称为止浆岩盘改进法, 采用式(1)计算临界安全岩柱.

$$S = K_a K_b K_c \frac{PD}{4[\tau]} \quad (1)$$

式中:  $S$  为临近突出危险区的安全岩柱厚度, m;  $K_a$  为预留安全系数, 在揭煤突出危险区取值为 1.1;  $K_b$  为瓦斯压力修正系数, 针对松坎隧道  $K_b$  取值为 1.3;  $K_c$  为地质条件修正系数, III 级围岩取 1;  $P$  为实测瓦斯压力值, 松坎隧道实测瓦斯压力值为 2.63 MPa;  $D$  为隧道首次揭煤断面的平均直径, 松坎隧道的断面平均直径为 12 m;  $\tau$  为岩石的允许抗剪强度, 结合现场取值为 1.4 MPa.

将以上参数的数值代入式(1), 可以计算出松坎隧道揭煤施工的最小安全岩柱厚度约为 8.06 m.

### 2.2 多元回归分析改进法

第 2 种理论估算方法称为多元回归分析改进法, 采用式(2)计算临界安全岩柱.

$$S = K_a (0.952A + 7.109\lambda^{-0.8305} - 0.0348D_c + 0.0009D_c^2 + 1.582\ln H - 12.9563) \quad (2)$$

式中:  $S$  为临近突出危险区的稳定岩盘厚度, m;  $A$  为围岩基本分级, 松坎隧道穿越煤层时的围岩为 III 级,  $A$  取值为 2;  $\lambda$  为围岩侧压力系数,  $1 \leq \lambda \leq 2$ , 结合工程实例取值为 1.1;  $D_c$  为突出危险区纵向长度, 取值为 60 m;  $H$  为隧道埋深, 该隧道穿煤段的埋深为 500 m.

将以上参数的数值代入式(2), 可计算出松坎隧道揭煤施工的最小安全岩柱厚度约为 7.15 m.

根据以上 2 种理论计算结果, 考虑隧道施工中其他因素的影响, 最后选取二者中的较大值 8.06 m 作为该隧道揭煤施工前的理论安全岩柱厚度.

## 3 数值模拟及分析讨论

### 3.1 隧道揭急倾斜煤层数值模型

根据现场实际的地质资料, 建立一个近距离煤层群隧道三维计算模型, 长、宽、高分别为 310, 162, 160 m, 属于反向上下两台阶大断面开挖, 建立的模型如图 2 所示. 隧道与煤层夹角为  $45^\circ$ , 煤层倾角为  $74^\circ$ , 煤岩体主要由泥岩、煤、砂岩、灰岩 4 类组成, 隧道平均埋深 500 m. 模型底部约束其垂直方向的自由度, 模型侧面约束其水平方向的自由度来模拟无限大空间, 模型顶部施加 10 MPa 的地层压力.

根据现场施工情况, 通过每个循环移除 1 m 隧道网格的方法来模拟隧道开挖. 每次开挖后, 对隧道模型进行应力与位移重分布计算.

### 3.2 临界安全岩柱判断准则

根据以上的隧道开挖模型, 拟采用止浆岩盘改进法和多元回归分析改进法 2 种方式相结合的方法来判别临界安全岩柱预留厚度.

止浆岩盘改进法采用围岩塑性变形量来计算临界安全岩柱厚度. 根据图 1 所示的工程概况, 随着隧道开挖的不断进行, 掌子面左下角位置与煤层的垂直距离最小, 该处会首先接近煤系地层. 因此, 定义隧道掌子面左下角处与 M1 煤层的垂直距离为该隧道揭煤的临界安全岩柱厚度. 隧道开挖扰动诱导的围岩塑性破坏将会沿隧道左下角方向贯穿岩柱到达煤层内部, 最终可能导致岩柱失稳和瓦斯突出事故. 因此, 在数值模拟过程中将塑性破坏区域完全贯穿岩柱到达煤层时的岩柱厚度作为临界安全岩柱厚度.

多元回归分析改进法采用力学强度理论来计算临界安全岩柱厚度. 岩体抵抗外力破坏的能力即为岩体强度, 隧道预留岩柱在三轴应力状态下, 通过摩尔-库伦强度准则可以表示出岩体上任一点的应力状态. 将极限应力圆与强度曲线相交作为试件破裂时的依据, 此时的应力临界状态如式(3)所示<sup>[5]</sup>.

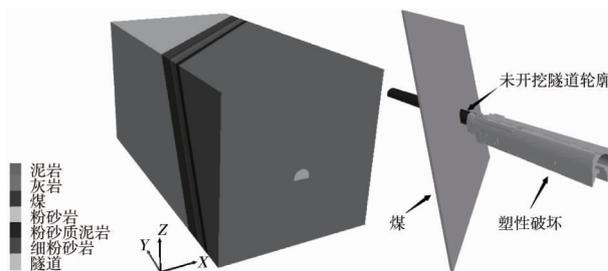


图 2 松坎隧道穿越煤系地层施工三维模型

$$\alpha_1 = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \alpha_3 + \frac{2k\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3)$$

式中： $\alpha_1$  为岩石最大主应力； $\varphi$  为内摩擦角； $\alpha_3$  为最小主应力； $k$  为内聚力。

根据松坎隧道现场的实际情况，煤系地层以碳质泥岩为主，取  $\varphi = 26^\circ$ ， $k = 0.94 \text{ MPa}$ ，代入式(3)可得

$$\alpha_1 = 2.56\alpha_3 + 3. \quad (4)$$

由式(4)可知：当隧道掌子面开挖至某处后，掌子面前方围岩的最大主应力  $\alpha_1$  等于或者大于式(4)右边的数值时，前方围岩就会产生失稳破坏。

### 3.3 数值计算结果分析

为了更加直观、形象地说明开挖过程中塑性破坏的范围与煤层的关系，计算结果只保留煤层、未开挖隧道轮廓线和已挖形成的塑性区。依次选取隧道掌子面距 M1 煤层 6~9 m 时的塑性变形情况，隧道施工围岩塑性区的分布情况如图 3 所示。

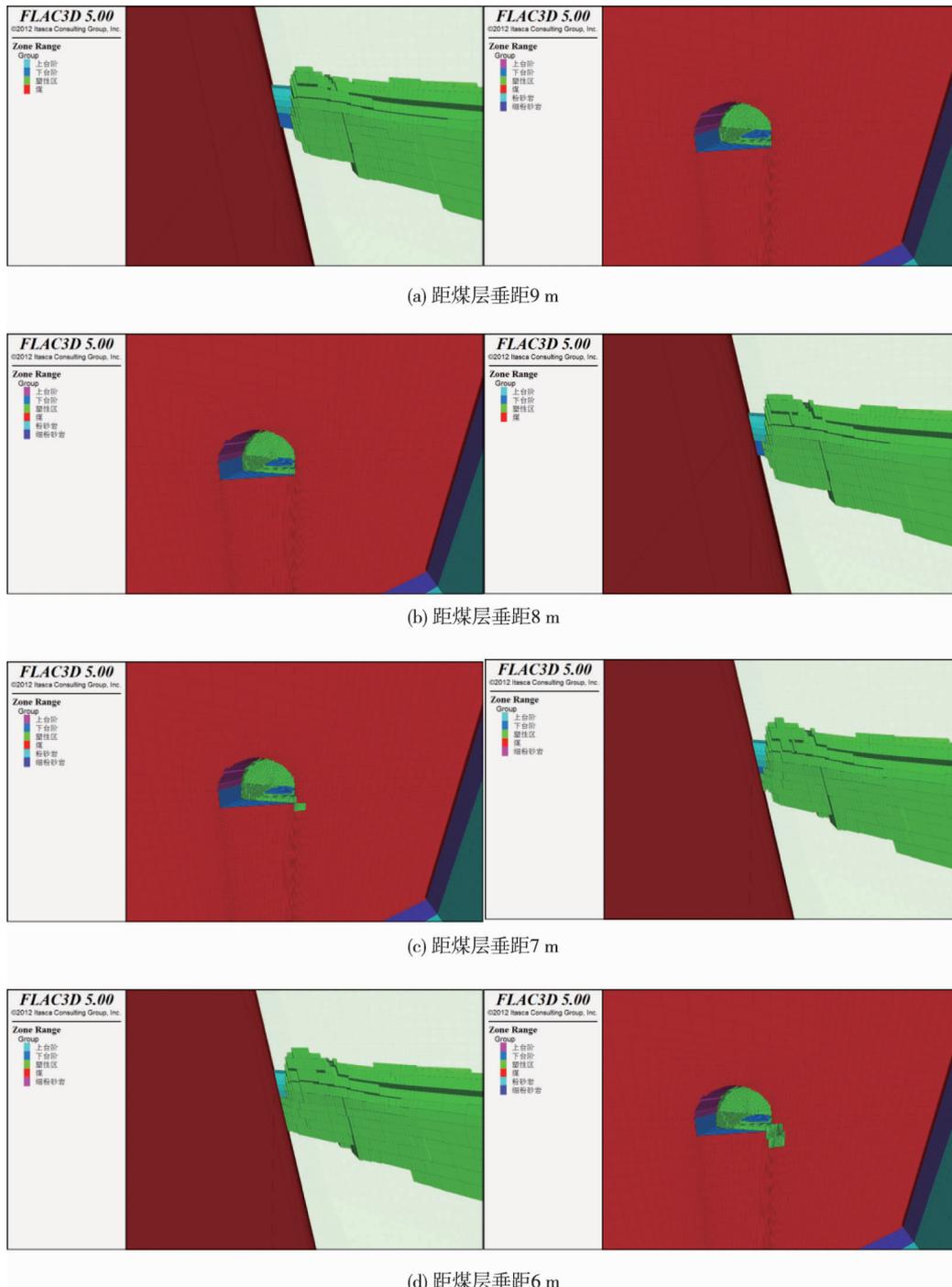


图 3 隧道施工围岩塑性区分布

由图 3 可知:隧道开挖后,在掌子面周边以及前方岩石中形成了一定范围的塑性破坏区,其中掌子面左前方由于软岩的出现形成的塑性区略大.随着隧道的开挖,塑性区不断向前延伸,距离煤层越来越近,表明随着掌子面前方岩柱的变薄,围岩破坏程度变大.由于塑性破坏尚未完全贯穿岩柱,不会造成岩柱失稳.当隧道开挖至掌子面距 M1 煤层 9 m 时,塑性破坏均未延伸至煤层,所留岩柱厚度能够满足安全要求,不会发生围岩失稳破坏;当隧道继续开挖至距 M1 煤层 8 m 时,少量塑性破坏区沿着隧道左下方延伸至煤层表面,但未贯穿到煤层内部;当隧道开挖至距 M1 煤层 7 m 时,大量塑性破坏区扩展至煤层内部,导致围岩发生失稳破坏.由此可见,该隧道揭煤前所留安全岩柱厚度不应小于 7 m.

为了准确地反映围岩应力变化的情况,本次模拟在上台阶左下角底板距 M1 煤层 9, 8, 7 m 处分别以水平间隔 3 m、垂直间隔 3 m 的方式布置 3 条监测线,在 3 条监测线上分别设置 5 个应力监测点,依次命名为  $C_1 \sim C_{15}$ ,在每次隧道开挖后提取 15 个监测点的最大和最小主应力,并根据式(4)来判断围岩的稳定性,提取的应力数据与计算结果如表 1 所示.

表 1 距煤层不同垂距位置处的围岩破坏情况

监测点	距露煤点垂距 7 m				监测点	距露煤点垂距 8 m				监测点	距露煤点垂距 9 m			
	$\alpha_1$ / MPa	$\alpha_3$ / MPa	式(4) 右边	围岩 状态		$\alpha_1$ / MPa	$\alpha_3$ / MPa	式(4) 右边	围岩 状态		$\alpha_1$ / MPa	$\alpha_3$ / MPa	式(4) 右边	围岩 状态
$C_1$	13.34	4.94	15.65	未破坏	$C_1$	12.89	4.87	15.472	未破坏	$C_1$	12.57	4.81	15.314	未破坏
$C_2$	13.57	4.09	13.48	破坏	$C_2$	13.27	4.23	13.834	未破坏	$C_2$	12.99	4.35	14.132	未破坏
$C_3$	13.02	3.69	12.45	破坏	$C_3$	12.95	3.89	12.960	未破坏	$C_3$	12.83	4.07	13.412	未破坏
$C_4$	12.14	3.50	11.97	破坏	$C_4$	12.30	3.71	12.486	未破坏	$C_4$	12.36	3.89	12.955	未破坏
$C_5$	11.26	3.68	12.43	未破坏	$C_5$	11.52	3.81	12.746	未破坏	$C_5$	11.70	3.94	13.086	未破坏
$C_6$	13.76	4.86	15.43	未破坏	$C_6$	13.27	4.79	15.259	未破坏	$C_6$	12.88	4.75	15.164	未破坏
$C_7$	13.89	4.17	13.68	破坏	$C_7$	13.56	4.23	13.841	未破坏	$C_7$	13.27	4.32	14.053	未破坏
$C_8$	13.32	3.77	12.66	破坏	$C_8$	13.23	3.86	12.875	破坏	$C_8$	13.09	3.98	13.192	未破坏
$C_9$	12.48	3.50	11.96	破坏	$C_9$	12.54	3.66	12.369	破坏	$C_9$	12.55	3.80	12.724	未破坏
$C_{10}$	11.60	3.67	12.39	未破坏	$C_{10}$	11.73	3.75	12.609	未破坏	$C_{10}$	11.84	3.86	12.878	未破坏
$C_{11}$	13.68	4.86	15.44	未破坏	$C_{11}$	13.35	4.79	15.259	未破坏	$C_{11}$	13.06	4.80	15.280	未破坏
$C_{12}$	13.47	4.52	14.58	未破坏	$C_{12}$	13.27	4.23	13.841	未破坏	$C_{12}$	13.08	4.55	14.644	未破坏
$C_{13}$	13.25	4.15	13.62	未破坏	$C_{13}$	13.14	3.86	12.875	破坏	$C_{13}$	13.01	4.23	13.821	未破坏
$C_{14}$	12.80	3.92	13.03	未破坏	$C_{14}$	12.75	3.66	12.369	破坏	$C_{14}$	12.70	4.03	13.314	未破坏
$C_{15}$	12.18	3.93	13.06	未破坏	$C_{15}$	12.18	3.75	12.609	未破坏	$C_{15}$	12.18	4.03	13.307	未破坏

由表 1 可知:当掌子面开挖至距 M1 煤层垂距 9 m 时,所设置监测点位置的围岩均没有产生破坏,说明开挖扰动造成的影响尚未导致煤层附近的围岩失稳;当掌子面开挖至距 M1 煤层垂距 8 m 时,少量监测点处的围岩开始出现破坏状态,说明破碎区已经延伸至预留岩柱内部,但未完全贯穿;当掌子面开挖至距 M1 煤层垂距 7 m 时,较多监测点处的围岩出现破坏状态,且破碎区域大多完全贯穿预留岩柱,部分破坏延伸至煤层内部.应力计算结果与塑性破坏区变化得出的规律是一致的,隧道揭煤前所留安全岩柱厚度不应小于 7 m.

## 4 结论

1) 通过理论计算的方式估算出松坎隧道揭煤的临界安全岩柱厚度为 8.06 m,在此基础上采用数值模拟的方式获得该临界安全岩柱厚度为 7 m.

2) 结合隧道现场情况,考虑围岩节理裂隙、瓦斯渗流与施工作业等方面的综合影响,最终选取 9 m 作为松坎隧道揭煤施工前的预留安全岩柱厚度.

3) 根据理论计算数值,指导隧道施工方在距煤层垂距 9 m 处进行钻孔抽排瓦斯,待瓦斯指标达标后顺利揭露了 M1 层煤,直至隧道安全穿过煤系地层.表明所选取的临界安全岩柱厚度合适,可为相同工况

的瓦斯隧道施工提供一定的理论支撑.

### 参考文献:

- [1] 郭佳奇.侧部高压富水溶腔与隧道间岩柱安全厚度研究[C]//岩石力学与工程的创新和实践:第十一次全国岩石力学与工程学术大会.2010:522.
- [2] 朱浩博.岩溶隧道底板安全厚度预测模型研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [3] 张骞,白松松,高昱,等.穿越破碎带隧道掌子面力学模型及最小安全厚度研究[J].中国公路学报,2018,31(10):141-149.
- [4] 周蔚文,吴立,袁青.断层构造对隧道开挖安全厚度的影响[J].建材与装饰,2016(46):230-231.
- [5] 陈凌云.公路穿煤隧道揭煤施工过程中岩柱稳定性分析[D].重庆:重庆大学,2009.
- [6] 龚兵文,孙臣,胡杰.大断面石门揭煤突出预测技术研究——以华蓥山隧道为例[J].能源与环保,2018,40(11):86-89.
- [7] 赵晨,张召千.采空区下铁路隧道安全岩柱稳定性分析[J].山西煤炭,2011,31(2):31-33.
- [8] 姚海波,杜宇,张文选,等.油气田瓦斯隧道开挖掌子面围岩安全厚度研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(1):168-174.
- [9] 彭宇峰,田亮,杨东升,等.玉京山隧道中厚煤层瓦斯抽放技术[J].隧道建设(中英文),2017,37(12):1600-1606.
- [10] Wei Y, Lu C, Lin B, et al. Tunnelling outburst potential affected by mechanical properties of coal seam [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83(1):99-112.
- [11] Fang Y, Xu C, Cui G, et al. Scale model test of highway tunnel construction underlying mined-out thin coal seam [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 56(6):105-116.
- [12] 刘创印.高瓦斯隧道揭煤及防突施工研究[J].建筑技术开发,2019,46(1):62-64.
- [13] Bandini A, Berry P, Cormio C, et al. Safe excavation of large section tunnels with Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine in gassy rock masses: The Sparvo tunnel case study[J].Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 67(8):85-97.
- [14] 谢衍光,苟德强,陈成军.瓦斯突出隧道防突安全岩盘厚度计算方法研究[J].铁道工程学报,2017,34(3):53-57.