

大断面瓦斯隧道“五步法”预测揭煤技术应用研究*

李文树¹,周东平^{2,3},郭臣业²,张尚斌²,徐涛²

(1.重庆市能源投资集团有限公司,重庆 400060;2.重庆市能源投资集团科技有限责任公司,重庆 400060;
3.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:为确保大断面瓦斯隧道揭煤施工的进度和安全,针对大断面隧道揭煤施工存在的瓦斯安全问题,提出了“五步法”预测揭煤新技术。研究表明:(1)以“分步集中实施区域措施、分层预测检验揭煤”为核心的“五步法”预测揭煤新技术,是视多层突出煤层群的邻近层为一层进行区域措施瓦斯治理,减少了逐层处理的重复环节,缩短了瓦斯治理时间;(2)区域措施中增加了对煤层群分组水力压裂的增透方法,与相似区域相比抽采达标时间缩短了35 d,缩短47%;(3)利用“五步法”预测揭煤技术和煤层群分组水力压裂增透技术后,该瓦斯隧道揭煤时间比预期节省200多天。

关键词:大断面;瓦斯隧道;隧道揭煤;五步法预测;瓦斯预抽;水力压裂

中图分类号:TD26

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)01-0262-07

Application of “Five-step” Forecasting Technology for Uncovering Coal Seam of Large Cross Section Gas Tunnel

Li Wenshu¹, Zhou Dongping^{2,3}, Guo Chenye², Zhang Shangbin², Xu Tao²

(1. Chongqing Energy Investment Group Co., Ltd., Chongqing 400060, P.R. China; 2. Chongqing Energy Investment Group Technology Co., Ltd., Chongqing 400060, P.R. China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R. China)

Abstract: In order to ensure the progress and safety of the construction of the large-scale gas tunnel, the paper puts forward the “five-step method” to predict the new technology of coal caving. These conclusions are proved: (1) The “five-step method”, which is based on the “step-by-step implementation of regional measures and stratified forecast test and exposing coal”, is a new measure of coal caving. It reduces the repetition of the layer by layer with shortening the gas treatment time. (2) In the regional measures, the method of increasing the hydraulic fracturing of the coal seam group is increased by 35 days and 47% compared with the similar area. (3) Using the “five-step method” to predict the exposing coal technology and hydraulic fracturing enhanced permeability technology makes the entire coal seam group gas tunnel uncovering time to save more than 200 days.

Keywords: large cross section; gas tunnel; tunnel uncovering coal; five-step prediction; gas pre-drainage; hydraulic fracturing

* 收稿日期:2018-07-12(修改稿)

作者简介:李文树(1965-),男,四川仁寿人,硕士,高级工程师,主要从事煤矿开采、瓦斯治理等领域的管理与研究工作。E-mail:657757771@qq.com

基金项目:重庆市杰出青年基金(cstc2014jcyj90002)

0 引言

随着我国交通网络的建设与发展,隧道工程所占的比例越来越大,穿越的地质条件也越来越复杂性,部分铁路、公路隧道不得不从煤系地层中穿过,而隧道瓦斯灾害的发生严重威胁隧道工程的施工安全,特别是煤与瓦斯的突出更为严重^[1-6]。由于隧道断面与煤矿巷道断面的差别较大,所以隧道揭煤与煤矿巷道揭煤的施工工艺及用途上都有较大差异,铁路瓦斯隧道揭煤与煤矿井下石门揭煤既有共性又有其不同之处,《防治煤与瓦斯突出规定》与《铁路瓦斯隧道技术规范》分别对揭煤工艺流程进行了要求^[7-12]。突出煤层揭煤必须按照区域综合防突措施与局部综合防突措施的两个“四位一体”瓦斯防突综合措施进行,研究大断面隧道揭煤两个“四位一体”预测揭煤技术非常有必要,本文

基于以上需求,进行了大断面瓦斯隧道“五步法”预测揭煤新技术研究并进行了实践应用,取得了较好效果,值得相似工程借鉴。

1 隧道工程地质概况

贵州某隧道起止里程为 DK149+846~DK157+464,全长 7 618 m,为铁路双线隧道,为特大断面(128 m²)。隧道设计在出口工区正洞 DK155+413~DK155+588 段穿越二叠系龙潭组页岩、砂岩夹煤层,共 9 层煤,为焦煤,煤层倾角 34°,煤层走向 N60°E,煤层与隧道轴向夹角为 65°,煤系地层总长度 175 m,瓦斯压力为 0.45~1.5 MPa,瓦斯含量 6.82~21.34 m³/t。煤层瓦斯赋存基本参数如表 1 所示。周边煤矿瓦斯等级鉴定报告表明该段含煤地层为高瓦斯并具有突出危险性。

表 1 煤层瓦斯基本参数

Table 1 The basic parameters of coal seam gas

煤层 编号	煤层 厚度/m	煤层 间距/m	瓦斯 压力/MPa	瓦斯含量 /(m ³ ·t ⁻¹)	坚固性 系数/f	放散初速 度/ΔP	吸附常数	
							a	b
K ₁	0.34		/	/	/	/	/	/
		6.95						
K ₂	1.86		0.45	10.75	/	/	/	/
		25.72						
K ₃	0.24		/	21.34	/	/	/	/
		7.49						
K ₄	1.67		0.60	12.26	0.2	13.15	31.11	0.99
		8.68						
K ₅	1.58		0.62	9.25	/	/	/	/
		5.62						
K ₆	0.35		/	7.23	/	/	/	/
		7.67						
K ₇	0.51		/	7.53	0.2	11.19	25.69	1.01
		2.41						
K ₈	0.70		1.50	7.61	0.1	11.78	29.42	0.99
		1.87						
K ₉	1.01		/	6.82	0.2	11.39	27.33	0.96

根据《煤矿安全规程》要求^[7],对于大于 0.3 m 的煤层都必须严格执行突出煤层的揭煤程序。此

隧道大于 0.3 m 的煤层有 8 层之多,如果按照规程规定的程序逐层采取局部措施预测揭煤,无法满足

工期要求。为了既能够符合规程规范和现场安全的要求,又能够保证工期内完成任务,研究了“五步法”预测揭煤技术。

2 “五步法”瓦斯隧道揭煤的提出

2.1 提出依据

《煤矿安全规程》(2016 版)第二百一十四条规定,井巷揭穿(开)突出煤层必须遵守^[8]:在工作面距离煤层法向距离 10 m(地质构造复杂、岩石破碎区域 20 m)之外施工 2 个前探钻孔,掌握煤层赋存条件、地质构造、瓦斯情况;从工作面至煤层法向距离大于 5 m 处开始直至揭穿煤层,全过程都应当采取局部综合防突措施;揭煤工作面距离煤层法向距离 2 m 至进入煤层顶(底)板 2 m 的范围,均应当采用远距离爆破掘进工艺。因为断面较大,为了确保安全,探测设置了 20 m 垂距初探和 10 m 垂距精探两种,并且在 10 m 垂距实施区域防突措施和效果检验;5 m 垂距时开始实施局部防突综合措施的预测;2 m 垂距进行局部防突措施的验证;过煤

门也是执行局部防突综合措施的预测。

2.2 “五步法”瓦斯隧道揭煤技术内容

为了在符合相关规程规范的情况下安全快速地揭穿煤层,满足现场需要,对该大断面隧道揭煤工艺流程进行了全面分析研究,最终提出了“分步集中实施区域措施、分层预测检验揭煤”的总体思路。具体是分两步走分别对距离较近的 $K_0 \sim K_4$ 煤层、 $K_2 \sim K_1$ 煤层集中进行区域措施处理,然后对抽采达标后的煤层分别进行局部预测检验和揭煤施工,使得隧道揭煤的流程与两个“四位一体”瓦斯防突综合措施相融合,既能满足规程规范的要求又能够省去分层处理的重复环节,从而缩短揭煤时间。

“五步法”预测揭煤技术即是指对待揭煤层进行以 20 m 垂距初探、10 m 垂距精探及预测、5 m 垂距预测、2 m 垂距验证、过煤门预测的 5 步预测揭煤技术。“五步法”预测揭煤技术全面结合了两个规定对每层煤揭煤流程中关键距离控制及预测方法的要求,其工艺流程如图 1 所示。

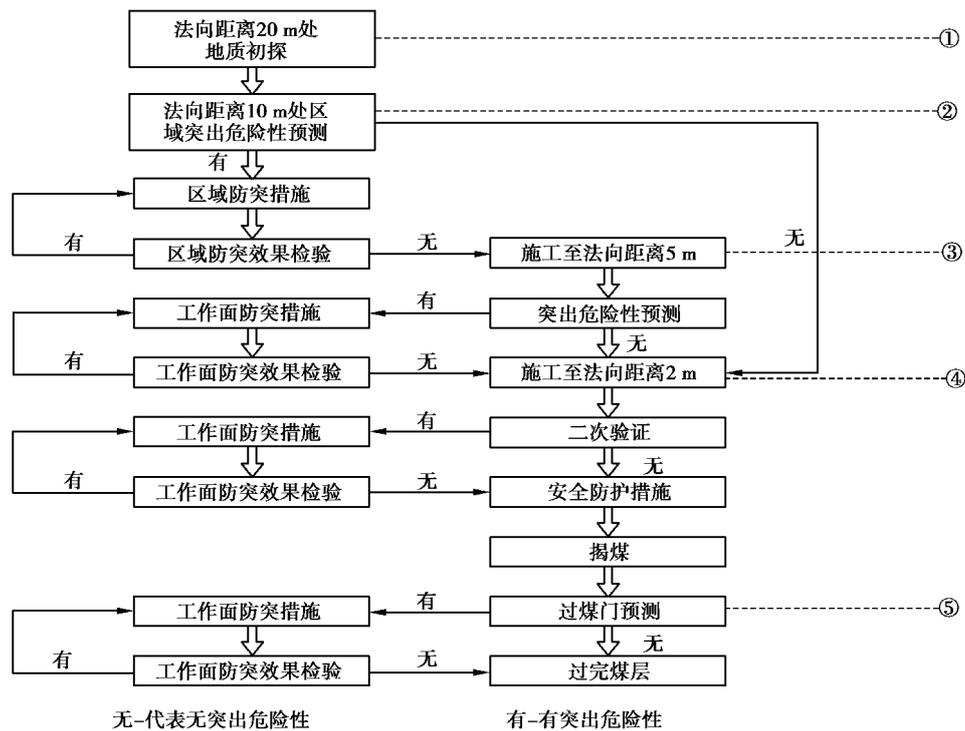


图 1 大断面瓦斯隧道“五步法”预测揭煤技术工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of five-step prediction technology of coal seam with large section gas tunnel

3 “五步法”瓦斯隧道揭煤技术实施

3.1 垂距 20 m 初探

在距煤层 20 m 垂距进行初探钻孔施工,掌握

煤层数量和煤层位置,记录异常现象,初步判断煤与瓦斯突出特征。由于多个参数的不确定,施工单个钻孔可能会出现无法见煤的情况,因此,初探钻孔数量确定为 3 个,钻孔的方向分别沿隧道轴向的

水平钻孔、与隧道轴向一定夹角的水平钻孔及与煤层垂直方向的钻孔,钻孔设计如图2所示。

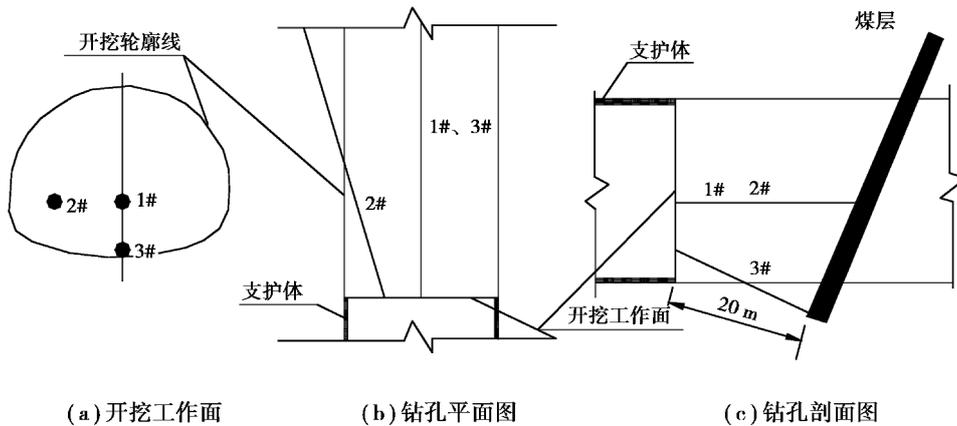


图2 垂距20 m初探钻孔示意图

Fig. 2 Vertical distance of 20 m drill hole schematic diagram

3.2 垂距10 m精探及预测

3.2.1 地质精探

在10 m垂距处,为精确确定煤层的产状(包括煤层厚度、倾向、倾角)、煤层间距及顶、底板岩性,精探钻孔确定为3个,并取芯。需穿透煤层

全厚,其终孔位置控制在开挖轮廓外5 m左右。3个超前钻孔由1个仰孔和2个水平边孔组成,仰孔起到控制煤层倾角的作用,2个水平边孔起到控制煤层走向的作用。10 m垂距精探钻孔如图3所示。

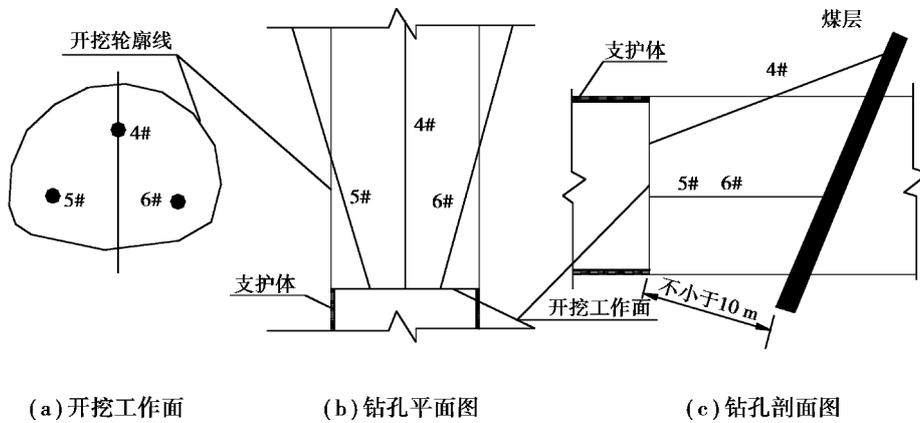


图3 取芯钻孔设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of core drilling design

3.2.2 突出危险性预测

在进行10 m垂距精探的同时,对煤层的突出危险性进行预测。预测结果见表2。

3.2.3 区域防突措施

根据表2显示,有4个突出危险煤层(K_2 、 K_4 、 K_5 、 K_9)。区域措施分两步走,主要是针对4个突出煤层进行区域预抽:第一步对 $K_4 \sim K_9$ 煤

层集中预抽,第二步对 $K_1 \sim K_2$ 煤层进行集中预抽, K_3 煤层小于0.3 m不采取区域措施。预抽钻孔孔径 $\phi 75$ mm,孔底间距为4 m,控制隧道开挖断面顶、上台阶底部轮廓线外12 m,两边轮廓线外14 m,同时满足控制边缘到隧道轮廓线的最小距离不小于5 m,终孔至各煤层底板0.5 m处。

表 2 $K_1 \sim K_9$ 煤层瓦斯基本参数测定结果
Table 2 $K_1 \sim K_9$ coal seam gas basic parameters determination

煤层编号	设计参数				实测参数					判定结果
	瓦斯压力 /MPa	瓦斯含量 /($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	坚固性系数 f	放散初速度 ΔP	瓦斯压力 /MPa	瓦斯含量 /($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	坚固性系数 f	放散初速度 ΔP	煤层破坏类型	
K_1	/	/	/	/	0.56	5.25	/	/	/	非突出煤层
K_2	0.45	10.75	/	/	1.07	11.80	0.38	18.00	IV	突出煤层
K_3	/	21.34	/	/	/	/	/	/	/	煤线
K_4	0.60	12.26	0.20	13.15	0.88	8.56	0.31	15.00	III	突出煤层
K_5	0.62	9.25	/	/	1.33	15.01	0.23	22.00	IV	突出煤层
K_6	/	7.23	/	/	/	/	/	/	/	无
K_7	/	7.53	0.2	11.19	0.32	6.35	0.55	11.00	III	非突出煤层
K_8	1.50	7.61	0.10	11.78	0.14	4.89	0.41	9.00	II	非突出煤层
K_9	/	6.82	0.20	11.39	0.82	11.11	0.39	18.00	III	突出煤层

为增加煤层透气性、提高瓦斯抽采效率、缩短抽采时间,预抽之前对煤层进行水力压裂增透技术进行处理,压裂也是分两步走。第一步对 $K_4 \sim K_9$ 煤层又分为 3 组进行压裂(K_6 煤层小于 0.3 m 不采取压裂措施),分别是 K_4 和 K_5 单层压裂, $K_7 \sim K_9$ 煤层联合压裂,每组布置 1 个压裂孔。第二步对 K_2 煤层进行单独压裂, K_1 非突出煤层不压裂。压裂钻孔孔径 $\phi 75$ mm,倾角为 3° ,钻孔穿过煤层至顶板 0.5m 终孔落在隧道中心位置,封孔采用水泥砂浆封孔,封至突出煤层的底板。

3.2.4 区域措施效果检验

区域措施执行后,进行接管抽采,并按期计算残余瓦斯含量,待计算残余瓦斯含量低于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 后,进行效果检验(残余瓦斯含量现场测定)。

区域防突措施效果检验钻孔设计需控制范围的上、中、下及左右部,每个突出煤层设计检验钻孔 5 个,至少 1 个孔在距离钻孔控制范围边缘 2 m 范围内,钻孔孔径 $\phi 89$ mm,钻孔设计如图 4 所示。

3.3 垂距 5 m 预测

区域措施检验有效时,方可将隧道开挖至距煤层 5 m 垂距处,并进行区域验证(也是局部预测)。预测方法采用钻屑指标法与瓦斯压力法相互验证,瓦斯压力可通过实测的瓦斯含量计算得出,在此主

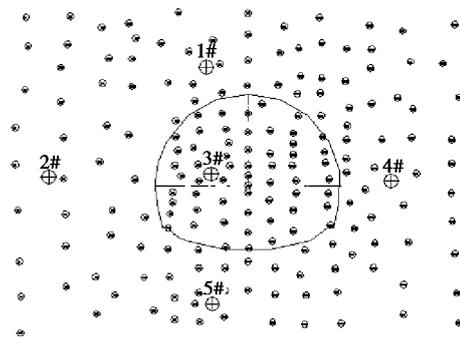


图 4 区域措施效果检验钻孔图

Fig. 4 Effect of regional measures

要采用钻屑指标法进行验证。钻屑瓦斯解析指标 K_1 值、 Δh_2 值的临界值见表 3。

表 3 钻屑指标法预测突出危险性的临界值表

Table 3 Cut-off index method to predict the outburst the critical value table

煤样类别	K_1 ($\text{ml}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})^{-1}$)	Δh_2 指标临界值/Pa
干煤	0.5	200
湿煤	0.4	160

进行 5 m 预测时的孔数至少 3 个,因为断面较大,共设计钻孔 30 个,控制隧道轮廓线外上方 9.5 m、下方 3.8 m、左右各 5.2 m,钻孔孔径 $\phi 75$ mm,如图 5 所示。

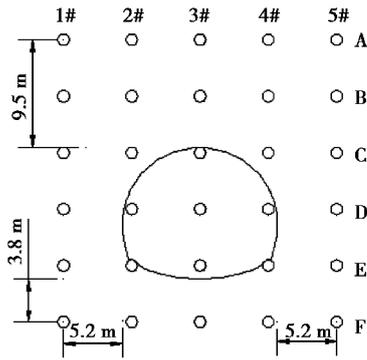


图5 5 m垂距预测钻孔设计示意图
Fig. 5 Schematic diagram of 5 m offset predicting drilling design

3.4 垂距 2 m 验证

隧道开挖至距待揭煤层 2 m 时,需进行 2 m 垂距验证。检验方法同样采用钻屑指标法,钻孔孔数同样按 30 个进行设计,验证钻孔布置在 5 m 垂距预测钻孔与抽排竣工钻孔的空隙中,控制隧道轮廓线外上方 6.5 m、下方 2 m、左右两边各 3.3 m,钻孔孔径 $\phi 75$ mm,如图 6 所示。

3.5 过煤门预测

2 m 垂距检验不超标并将金属骨架施工完成且凝固后,执行安全防护措施揭开煤层。煤层揭开后,检验开挖工作面前方 10 m 上、中、下、左、右范围内煤与瓦斯突出的危险性。如各项指标(钻屑指标法与瓦斯压力法)均符合要求,可掘进 5 m;再检验前方 10 m 达标后,再掘进 5 m,始终保持工作面前方有 5 m 的安全区。如任一指标达到或超过临界值时,应采取补充防突措施,直至有效。煤门预

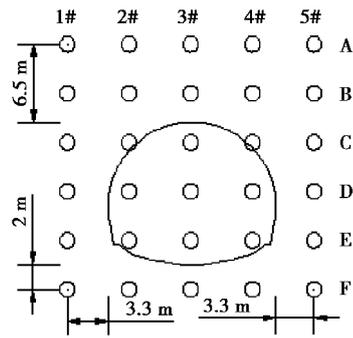


图6 2 m垂距检验钻孔设计示意图
Fig. 6 Schematic diagram of drilling design for 2 m vertical distance inspection

测钻孔布置在揭开煤层处沿煤层倾向、走向施工,控制隧道开挖轮廓线外上下左右各 3 m,钻孔孔径 $\phi 42$ mm,如图 7 所示。

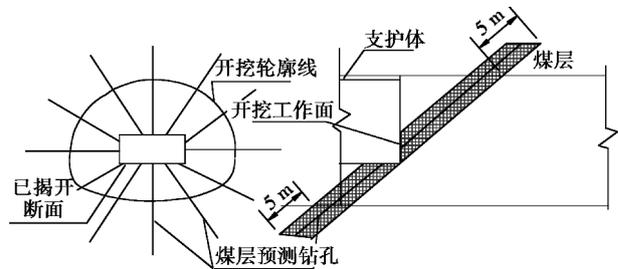


图7 煤门预测钻孔设计图
Fig. 7 Coal gate prediction drilling design

4 效果分析

$K_9 \sim K_4$ 煤层预抽钻孔累计抽采 40 d, K_2 煤层累计抽采 7 d,负压约为 30~32 KPa,各煤层瓦斯抽排情况见表 4。

表4 隧道各突出煤层瓦斯抽排表

Table 4 Gas drainage table of each outburst coal seam in tunnel

编号	抽放时间/d	控制范围内孔数/个	原始瓦斯含量/($m^3 \cdot t^{-1}$)	瓦斯储量/ m^3	瓦斯抽采量/ m^3	瓦斯排放量/ m^3	瓦斯抽排总量/ m^3	抽排率/%	计算残余瓦斯含量/($m^3 \cdot t^{-1}$)
K_9	40	296	11.11	271 069.9	127 150.3	6 811.2	133 961.5	49.4	5.62
K_5	40	188	15.01	271 069.9	127 150.3	6 811.2	133 961.5	49.4	7.60
K_4	40	144	8.56	271 069.9	127 150.3	6 811.2	133 961.5	49.4	4.33
K_2	7	132	11.80	50 872.0	17 188.0	729.0	17 917.0	35.2	7.64

对该隧道 $K_9 \sim K_4$ 煤层实施水力压裂增透后,瓦斯抽放浓度达 20.51%,最大抽放纯量达 4 000 m^3/d ,平均抽放纯量约为 3 400 m^3/d ,而相同地质条件下的相邻隧道采用常规技术进行抽放时,其瓦斯抽放浓度仅为 13%左右,纯量仅为

2 600 m^3/d 左右。

抽放 40 d 后,该瓦斯隧道 $K_9 \sim K_4$ 煤层的残余瓦斯含量均降至 8 m^3/t 以下,符合防治煤与瓦斯突出相关规定,抽放达标,如期进行了揭煤。对比采用常规技术进行抽放的其他标段瓦斯隧道,瓦斯

抽放 75 d 后才达标。该隧道 $K_9 \sim K_4$ 煤层过程中瓦斯抽放达标时间相比未实施压裂的相似区域缩短了 47%, 缩短达标时间 35 d。

5 结语

该隧道的所有煤层严格按照“五步法”预测大断面瓦斯隧道揭煤, 对突出煤层采用水力压裂增透后, 对抽采钻孔进行封孔后抽采, 两轮共计抽采 49 d, 共抽出瓦斯 144 338 m^3 。各煤层揭煤前, 均采用了金属骨架加强支护的安全措施, 所有煤层揭煤过程中未出现一次瓦斯超限及煤与瓦斯突出事故, 仅用时 10.8 个月即完成了所有煤层的揭煤及煤系地层的开挖工作, 较计划工期提前了约 200 余天, 为隧道安全快速揭煤创造了有利条件, 为渝黔铁路如期全线通车提供了时间保证, 达到了预期效果。

参考文献 (References)

- [1] 郑金龙, 张广洋, 李晓红, 等. 华蓥山隧道西口右线揭煤防突防塌技术[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 559-561. (Zheng Jinlong, Zhang Guangyang, Li Xiaohong, et al. Strategy of outburst prevention and collapse prevention in right seam of Huayingshan Tunnel West Entrance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 559-561. (in Chinese))
- [2] 段品佳, 王芝银. 煤岩孔隙率与渗透率变化规律试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1284-1288. (Duan Pinjia, Wang Zhiying. Experimental study on variation law of permeability and permeability of coal [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6): 1284-1288. (in Chinese))
- [3] 雷升祥. 瓦斯隧道施工技术与管理[M]. 中国铁道出版社, 2011. (Lei Shengxiang. Gas tunnel construction technology and management [M]. China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [4] 周东平, 沈大富, 余模华, 等. 地应力对瓦斯渗流特性影响的试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 59(增1): 6-8. (Zhou Dongping, Shen Dafu, Yu Mohua, et al. Experimental study on influence of ground stress on gas seepage characteristics [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 59(Supp.1): 6-8. (in Chinese))
- [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): 234-242. (Huang Changguo. Experimental technology and practice of coal seam outburst prevention in highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 234-242. (in Chinese))
- [6] 郭晨. 天坪隧道瓦斯快速抽放及揭煤工艺优化设计与实践[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2016. (Gou Chen. Table Design and practice of gas drainage and uncovering coal in Tianping Tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese))
- [7] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016. (State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Supervision Bureau. Coal mine safety regulations [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2016. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国铁道部. 铁路瓦斯隧道技术规范(TB 10120-2002)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. (The People's Republic of China Ministry of Railways. Railway gas tunnel technical specifications (TB 10120-2002) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [9] 中华人民共和国煤炭工业部. 防治煤与瓦斯突出规定[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009. (Ministry of Coal Industry of the People's Republic of China. Prevention and control of coal and gas outburst regulations [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2009. (in Chinese))
- [10] 郭业业, 覃乐, 李栋, 等. 地应力及原生裂隙对水力压裂起裂方向和起裂压力的影响[J]. 煤矿安全, 2015, 46(12): 161-165. (Guo Chenye, Qin Le, Li Dong, et al. Effect of in-situ stress and primary fracture on initiation direction and initiation pressure of hydraulic fracturing [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(12): 161-165. (in Chinese))
- [11] 郭业业, 沈大富, 张翠兰. 煤矿井下控制水力压裂煤层增透关键技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 114-118. (Guo Chenye, Shen Dafu, Zhang Cuilan. Key technology and application of enhanced permeability control in hydraulic fracturing coal seam in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 114-118. (in Chinese))
- [12] 刘新荣, 傅晏, 郑颖人, 等. 水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 77-82. (Liu Xinrong, Fu Yan, Zheng Yingren, et al. Study on the influence of water-rock interaction on rock degradation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 77-82. (in Chinese))