

文章编号: 1674—8247(2017)06—0038—07

# 铁路隧道高瓦斯突出段安全施工关键技术

赵柏文

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**渝黔铁路新凉风垭隧道洞身穿越二叠系龙潭组煤系地层,有可采煤层 9 层,最大瓦斯压力 1.5MPa,是煤系地层高瓦斯具突出性高风险的双线铁路隧道。为确保施工安全,在隧道施工过程中修改完善了瓦斯预测及验证设计,详细提出区域预测与验证、工作面预测与验证的具体要求,以及各个预测及验证步骤实施的位置和验证方法。为缩短抽放时间采用了水力压裂增透技术,达到了很好的抽放效果,并制定多煤层集中抽采结合下导坑自然排放的瓦斯抽排放方案。另引入了六大安全保护系统,有效地确保了工期及施工安全。

**关键词:**双线隧道;高瓦斯;突出;水力压裂;安全保护系统

中图分类号:U455

文献标志码:A

## Key Technologies for Safety Construction of High Gas Outburst Section of Railway Tunnel

ZHAO Baiwen

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** New Liangfengya tunnel on Chongqing – Guizhou line crossing the Longtan formation coal measure strata of Permian, there are 9 layers of workable seam, maximum gas pressure 1.5MPa, it is a double line railway tunnel with high outburst risk in coal measure strata. In order to ensure the safety of construction, in the process of tunnel construction, the gas prediction and verification design is improved, the specific requirements for regional prediction and verification, and the prediction and verification of the working face as well as location and verification methods for each prediction and validation step are presented in detail. In order to shorten the drainage time, hydraulic fracturing technology is applied in construction, and a good drainage effect is achieved, also the gas drainage scheme of multi-seam concentrated drainage combined with natural emission of the downside heading, in addition, six security protection systems are introduced to effectively ensure the construction period and construction safety.

**Key words:** double track tunnel; high gas; gas outburst; hydraulic fracturing; safety protection system

在铁路隧道施工领域,瓦斯隧道的施工技术相对于煤矿行业仍处于落后状态,这主要是由于铁路隧道在遇到煤系地层时主要以通过为目的,且在规划设计阶段对于煤系地层也是以绕避为主,同时受到观念和投资等的影响,在遇到煤系地层时也多选择大角度正交通过,对于缓倾多煤层高瓦斯具突出危险的隧道施工经验积累不足。但随着铁路隧道建设长度的增加,遇到复杂地层高瓦斯具突出危险的隧道越来越多,所

以研究如何准确的预测预报瓦斯突出危险的段落,如何通过抽放和排放等措施消除瓦斯突出威胁,如何建立健全安全保护系统,有效降低瓦斯溢出可能造成的燃烧、爆炸等风险,其意义也就越来越大了。

### 1 概述

渝黔铁路新凉风垭隧道全长 7 618 m,出口工区为高瓦斯突出工区,洞身有 175 m 通过二叠系龙潭组

收稿日期:2017-02-16

作者简介:赵柏文(1980-),男,高级工程师。

引文格式:赵柏文. 铁路隧道高瓦斯突出段安全施工关键技术[J]. 高速铁路技术,2017,8(6):38-44.

ZHAO Baiwen. Key Technologies for Safety Construction of High Gas Outburst Section of Railway Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2017,8(6):38-44.

页岩夹煤层,共 9 层可采煤,其中厚度大于 0.3 m 的煤层共 7 层,分别为 K1、K2、K4、K5、K7、K8、K9,突出煤层为 K2、K4、K5、K9,瓦斯压力最大 1.5 MPa,是典型的缓倾多煤层高瓦斯具突出危险性的隧道。煤层放大纵断面如图 1 所示,煤层主要参数如表 1 所示。

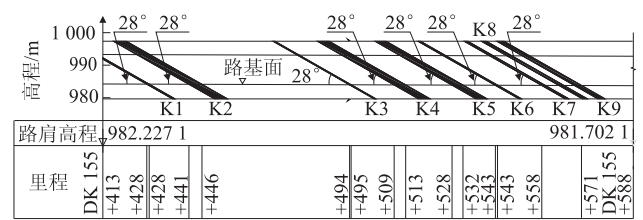


图1 煤层隧道中线纵断面图

表1 煤层主要参数

煤层	瓦斯压力 /MPa	瓦斯含量 /(t/m <sup>3</sup> )	煤层坚 固系数	瓦斯放 散初速度	煤的破 坏类型	判定结果
K9	0.815	11.11	0.39	18	Ⅲ	突出
K8	0.136	4.896	0.41	9	Ⅱ	不突出
K7	0.322	6.347	0.55	11	Ⅲ	不突出
K6	-	-	-	-	-	不突出
K5	1.327	15.01	0.23	22	Ⅳ	突出
K4	0.88	8.56	0.31	15	Ⅲ	突出
K3	-	-	-	-	-	不突出
K2	1.069	11.08	0.38	18	Ⅳ	突出
K1	0.557	5.25	-	-	-	不突出

施工图设计阶段根据钻探资料及附近煤矿的瓦斯压力等综合判定,本隧出口工区为高瓦斯突出工区,具突出危险性,根据煤层层厚及钻孔揭示的煤层及瓦斯参数,对煤层进行了防突设计,主要采用逐煤层区域瓦斯抽放结合工作面瓦斯排放方案,同时对于瓦斯探测、验证、揭煤、金属骨架等也做了相应的设计。

在揭煤施工前根据超前地质预报揭示煤层及瓦斯情况,结合现场实际及专家评审意见,对瓦斯抽排放方案进行了调整,对于区域预测具突出风险性的煤层进行瓦斯抽、排放,即 K4、K5、K9 煤层及 K2 煤层上台阶集中抽放,下台阶逐煤层排放的瓦斯消突措施,同时为缩短瓦斯抽放时间,增加了水力压裂措施;结合隧道开挖断面较大的特点,调整了瓦斯探测孔及瓦斯验证孔的孔数。同时为确保瓦斯工区的施工安全,完善了高瓦斯突出工区安全避险六大系统。

2 瓦斯预测、检验及消突措施

为防止煤与瓦斯突出,必须认真贯彻执行《防治煤与瓦斯突出规定》、《煤矿安全规程》及《铁路瓦斯隧道设计规范》的相关规定,做好每一步的预测和检验,合理客观的选择区域措施和局部措施,才能有效避免危险发生,各步骤程序示意如图 2 所示。

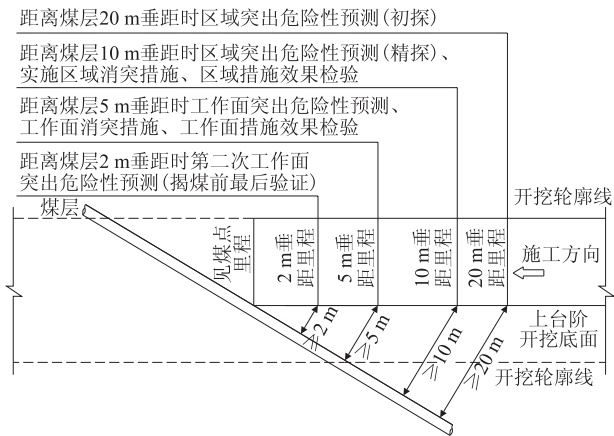


图2 揭煤施工程序示意图

2.1 高瓦斯突出危险性煤层与高瓦斯具突出危险性工区鉴定

根据《防治煤与瓦斯突出规定》,应对可能揭露的所有平均厚度在 0.3 m 以上的煤层进行突出危险性评估,当瓦斯压力达到或大于 0.74 MPa,且相邻矿井开采的同一煤层发生突出事故,则判定其按照突出煤层管理。根据地质深孔测压及附近桐梓煤矿发生突出事故,鉴定新凉风垭隧道煤层为高瓦斯突出危险性煤层,新凉风垭隧道出口工区为瓦斯具突出危险性工区。

2.2 距离煤层 20 m 垂距处施作区域性瓦斯突出危险性探测(初探)

根据《防治煤与瓦斯突出规定》第二十一条规定,在距离煤层最小法向距离小于 10 m 时(地质破碎带小于 20 m 时),必须边探边掘。结合施工图中深孔资料揭示的煤层间距、倾角等拟定将 9 层煤分成两组探测,即 K4~K9 煤层为一组,K1~K2 煤层为一组,在距离 K9 煤层法线距离 20 m 处设计第一组 5 孔  $\phi 89$  探孔(取芯),对 K4~K9 煤层进行初探,在距离 K2 煤层法线距离 20 m 处设计第一组 5 孔  $\phi 89$  探孔(取芯),对 K1~K2 煤层进行初探,探孔要求穿过煤层并进入岩层不小于 0.5 m,本次探测的目的是查清煤层在隧道开挖范围内的倾角、产状、层厚、各个煤层的瓦斯赋存情况及瓦斯参数等。K4~K9 煤层探孔布置如图 3 所示,K1~K2 煤层略。

2.3 距离煤层 10 m 垂距处施作区域性瓦斯突出危险性探测(精探)

结合《防治煤与瓦斯突出规定》第二十一条规定,无论在 20 m 处预测煤层是否有突出危险性,在隧道掘进至距离煤层法向距离 10 m,均应进行第二次突出危险性预测,精探孔按 5 孔  $\phi 89$  探孔(取芯)设计,具体布置及要求同初探孔;20 m 垂距和 10 m 垂距预测通过瓦斯压力、瓦斯含量、瓦斯放散初速度( $\Delta P \geq 10$ )、煤

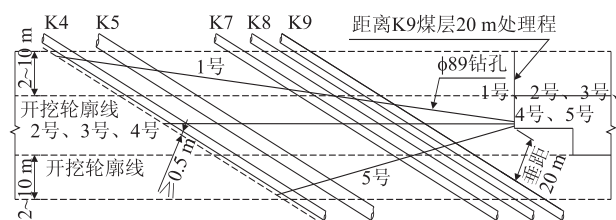


图3 K4~K9煤层20 m垂距处瓦斯突出危险性探测孔布置图

的坚固性系数( $f \leq 0.5$ )及煤的破坏类型(Ⅲ类及以上)对突出危险性进行预测。

#### 2.4 距离煤层10 m垂距处实施区域消突措施(水力压裂及瓦斯抽放)

根据《防治煤与瓦斯突出规定》第四十九条规定,瓦斯区域防突措施实施的最小法向距离为距离煤层7 m垂距,在构造破坏带适当加大距离。考虑到隧道施工开挖断面较大,在10 m垂距预测后再继续掘进3 m实施区域消突措施风险较大,故将施工图设计中的7 m垂距处的区域消突措施前移至10 m垂距处

实施。

当区域突出危险性预测(精探)确定具瓦斯突出性危险时,应采取预抽煤层瓦斯的区域防突措施,在进行抽采钻孔施工前,为提高煤层透气性,缩短抽采时间,采用水力压裂增透技术,新凉风垭隧道区域突出危险性预测K2、K4、K5、K9煤层为突出煤层,故在距K9煤层和K2煤层10 m垂距处施作两次水力压裂,第一次布置三个孔压裂K4、K5、K9煤层,第二次布置一个孔压裂K2煤层,压裂压力根据计算确定。

水力压裂完成后,在距离突出煤层10 m垂距处实施瓦斯抽放。抽放孔直径为 $\phi 75$ 探孔,开孔间距为 $0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ (横向 $\times$ 竖向)要求钻孔进入煤层底板岩层不小于0.5 m,各钻孔在煤层厚度1/2处的孔距不应大于2倍抽放半径,孔底间距不大于4 m,抽放范围按隧道开挖轮廓线上下12 m,左右14 m范围控制。新凉风垭隧道分两次进行瓦斯抽放,抽放地点在距离K9煤层及K2煤层10 m垂距处,第一次抽放K4、K5、K9煤层,第二次抽放K2煤层,K4~K9煤层瓦斯抽放孔布置如图4所示,K2煤层略。

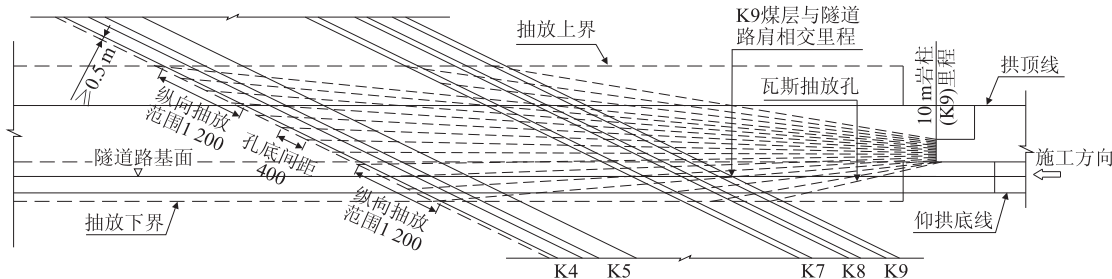


图4 K4、K5、K9煤层10 m垂距处瓦斯抽放孔布置图(cm)

#### 2.5 距离煤层10 m垂距处实施区域措施效果验证

在实施区域消突措施后,应进行区域措施效果检验,每个检验工作面共布置5个 $\phi 75$ 钻孔测试残余瓦斯压力,新凉风垭隧道分3次对K2、K4、K5、K9煤层进行区域效果检验,第一次检验地点为距离K9煤层10 m垂距处,检验K9煤层,第二次检验地点为距离K5煤层10 m垂距处,检验K4、K5煤层,第三次检验地点为距离K2煤层10 m垂距处,检验K2煤层。K9煤层钻孔布置如图5所示,区域验证指标为瓦斯压力和含量,其它煤层略。

#### 2.6 距离煤层5 m垂距处实施工作面突出危险性预测

根据《防治煤与瓦斯突出规定》第六十条规定:“工作面应保留的最小防突措施超前距为:煤巷掘进工作面5 m”。所以在完成区域消突措施并检验合格后,在隧道掘进至距离煤层5 m垂距处实施工作面突出危险性预测,预测孔直径为 $\phi 75$ ,采用钻屑指标法及

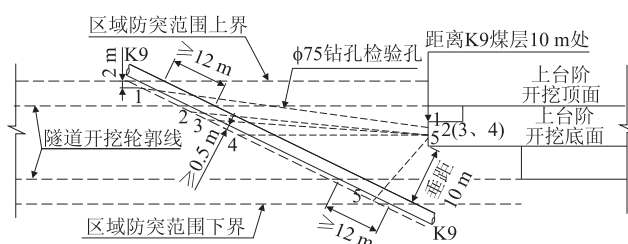


图5 K9煤层10 m垂距处区域效果检验孔布置

瓦斯压力法两种方法预测煤层是否具有突出性风险。考虑到隧道开挖断面比煤矿巷道大得多,为保证预测不留死角,对于10 m垂距处预测具突出性危险且实施区域消突措施的煤层,预测孔按照孔底间距8 m实施,预测范围为隧道开挖轮廓线外5 m,逐煤层实施,K9煤层5 m垂距验证预测孔的布置如图6所示,对于10 m垂距处预测无突出危险的煤层,预测孔按不少于3孔布置,逐煤层实施,K8煤层5 m垂距验证预测孔的布置如图7所示,其它煤层略。

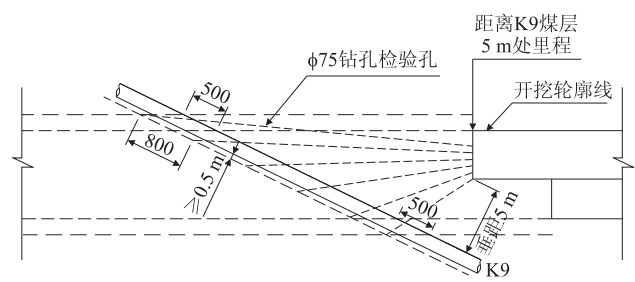


图 6 K9 煤层 10 m 垂距处突出危险性预测孔布置 (cm)

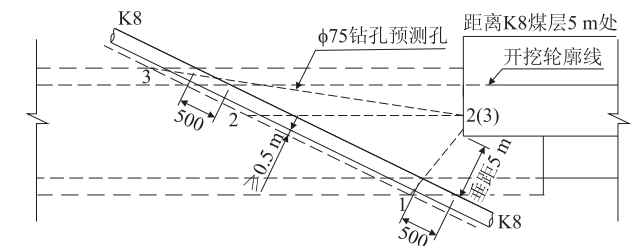


图 7 K8 煤层 10 m 垂距处突出危险性预测孔布置 (cm)

2.7 距离煤层 5 m 垂距处实施工作面防突措施(瓦斯排放)

当工作面预测确定煤层具瓦斯突出性危险时,在距离煤层 5 m 处施作瓦斯排放孔,排放钻孔可结合抽

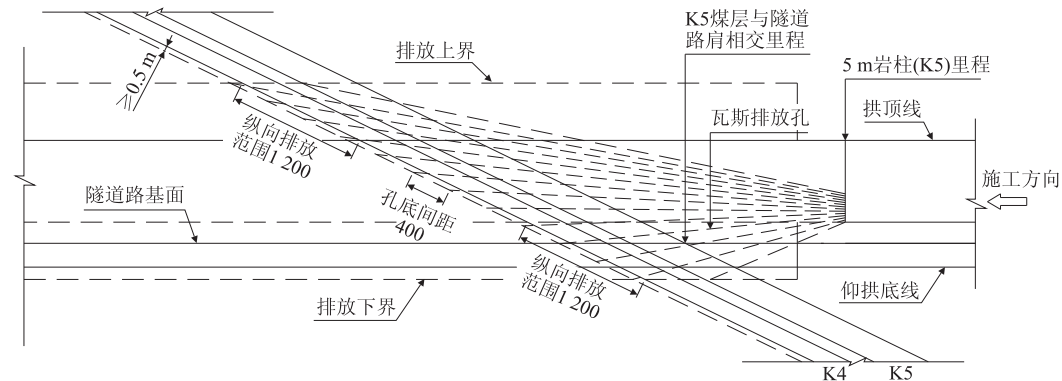


图 8 K4、K5 煤层 5m 垂距处工作面瓦斯排放孔布置图 (cm)

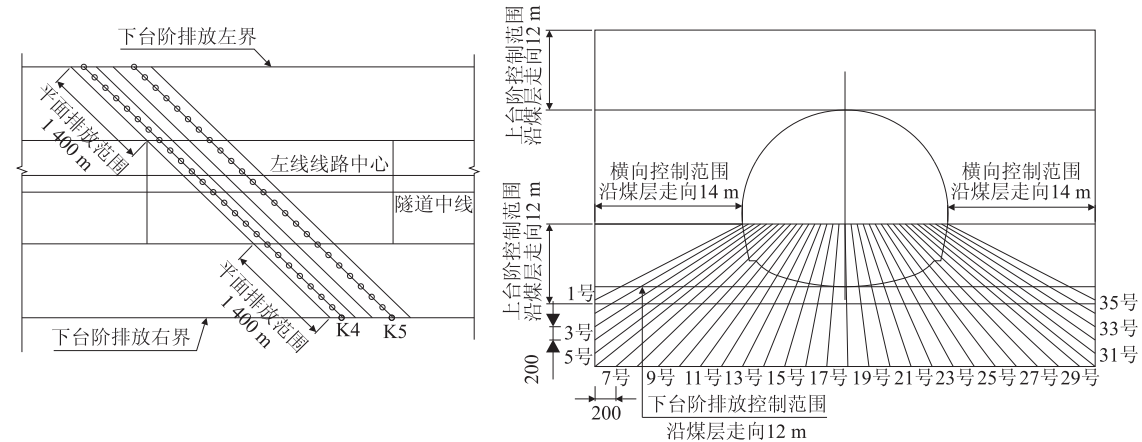


图 9 K4、K5 煤层 5 m 垂距处工作面瓦斯排放孔布置图 (cm)

放钻孔错孔布置,保证孔底间距不超过 2 m,钻孔直径为  $\phi 120$ 。排放孔结合工法上下台阶分开进行,上台阶在距离煤层 5 m 处实施,控制范围为上台阶开挖轮廓线外上下各 12 m,左右各 14 m,新凉风垭隧道工作面突出危险性预测 K4、K5 煤层为突出煤层,在距离 K5 煤层 5 m 垂距处实施工作面消突措施,K4、K5 煤层上台阶排放孔的布置如图 8 所示,下台阶顺煤层排放,在上台阶揭开煤层后实施,K4、K5 煤层下台阶排放孔的布置如图 9 所示。

2.8 距离煤层 5 m 垂距处实施工作面措施效果检验

在实施工作面消突措施后,应进行工作面措施效果检验,每个检验工作面共布置 5 个 75 钻孔测试残余瓦斯压力,新凉风垭隧道在距离 K5 煤层 5 m 垂距处施作一次工作面措施效果检验,检验 K5 煤层,钻孔布置如图 10 所示。

2.9 距离煤层 2 m 垂距处实施工作面突出危险性预测

当距离煤层 5 m 垂距处工作面预测煤层无瓦斯突出性危险时或在距离煤层 5 m 垂距处实施工作面消突措施后,继续掘进至距离煤层 2m 垂距处实施工作面



突出危险性预测,预测孔孔径 $\phi 75$ :采用钻屑指标法检验煤层是否具突出性危险。对于5 m垂距处预测具突出性危险且实施工作面消突措施的煤层,预测孔按照孔底间距8 m实施,预测范围为隧道开挖轮廓线外5 m,且逐煤层实施,K9煤层2 m垂距验证预测孔的布置如图11所示,对于5 m垂距处预测无突出危险的煤层,预测孔按不少于3孔布置,K8煤层2 m垂距验证预测孔的布置如图12所示,其它煤层略。

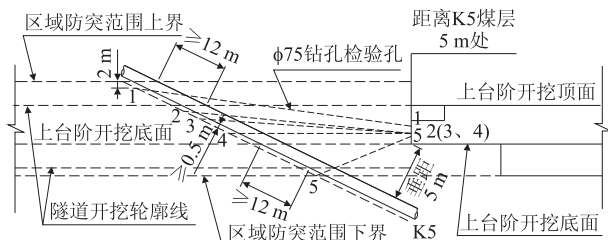


图10 K5煤层5 m垂距处工作面效果检验孔布置

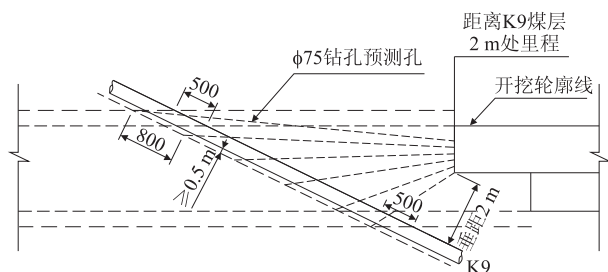


图11 K9煤层2 m垂距处突出危险性预测孔布置(cm)

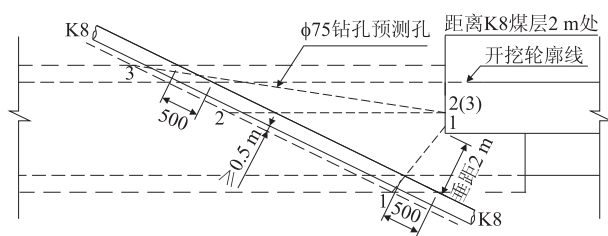


图12 K8煤层2 m垂距处突出危险性预测孔布置(cm)

## 2.10 施作安全防护措施开始揭煤

以上各道工序完成消除瓦斯突出危险,施作安全防护措施后揭煤,安全防护措施采用 $\phi 89$ 大管棚配合型钢钢架及大外插角 $\phi 42$ 注浆小导管作为金属骨架, $\phi 89$ 大管棚拱部环向间距0.3 m,边墙环向间距0.6 m,孔深必须穿过待揭煤层3 m, $\phi 42$ 注浆小导管,长4.5 m,纵向间距2.4 m,金属骨架施作位置为距离上台阶距离煤层2 m垂距处。揭煤施工的具体要求如下:

(1)施工人员必须进行岗前培训,方能上岗,并与救消大队建立联系,以防万一。需设专职瓦斯检查员,

经常检查、监测瓦斯,掌握突出预兆。

(2)建立稳妥可靠的通风系统,所有风机必须严格按“三专两闭锁”的相关要求配备,保证风机正常运转,任何时间严禁停风。

(3)揭煤前,工作面与煤层之间要留足安全岩柱,其最小距离不小于2 m。

(4)过煤层段必须采区以下措施:①采用湿式钻孔,严禁干法打孔;②采用水炮泥;③工作面喷水雾、渣堆洒水;④控制通风风速,防治煤尘飞扬;⑤及时运渣出洞,定时清扫洞内(包括洞壁)积沉煤尘。

(5)揭煤以及在煤层中开挖时,放炮点应设在洞外,放炮时隧道内必须停电,撤出所有人员,洞外人员及机电设备禁止正对洞门,揭煤前应清理洞口和通风机房周围50 m范围内的一切火源。

(6)过煤层段施工时,隧道断面应按设计及时施作初期支护,包括加强支护和超前支护。

(7)揭煤时,应设压风自救器,第一组自救器距离掌子面距离一般为30~50 m,以后每50 m安设一组,每组压风自救器的数目应大于工作面最多施工人数,每人供风量不小于 $10 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

(8)进入隧道内的所有人员,必须随身携带隔离式自救器。

(9)临时停工的区域不得停风,否则必须切断电源,设置栅栏和警标,恢复通风后,需经瓦检员检测,当瓦斯达到允许浓度后,方可复工,否则禁止任何人员入内。

(10)停工区瓦斯或二氧化碳浓度达到3%,必须在24 h内封闭。

(11)各种有害气体容许浓度按相关标准办理。

(12)进入煤系地层段后,爆破作业采用煤矿许用炸药,并采用煤矿许用毫秒级电雷管电力起爆。其中,炸药采用安全等级不低于三级的煤矿许用含水炸药。

## 3 水力压裂增透技术

水力压裂孔直径 $\phi 76$ ,本隧煤层为顶板揭煤,故要求水力压裂孔封孔至突出煤层顶板处,封孔段内端采用“马尾巴”封堵,注水泥浆封孔,压裂水压通过计算确定。

## 4 六大安全防护系统

六大安全防护系统由煤系地层安全监控系统、煤系地层人员定位系统、煤系地层紧急避险系统、煤系地层压风自救系统、煤系地层段供水施救系统、煤系地层

施工通信联络系统组成。

#### 4.1 煤系地层安全监控系统

选用 KJ90NA 型煤矿一体化安全监控系统一套,它是集安全、生产、网络管理为一体的大型综合监控系统,配备相应的传感器和监控分站。系统主干连接采用树型结构,安装扩展简单。

#### 4.2 煤系地层人员定位系统

考虑到与监测监控系统(KJ90NA)兼容,设计选用 KJ251A 型人员管理系统。人员定位管理系统由地面中心站、系统软件、传输平台、无线数据监测站、无线数据收发器、无线编码发射器及电源、传输电缆等组成。主要功能为人员、机械设备管理,可动态掌握人员、机械设备的分布位置、数量、活动状态,方便人员、设备施工调度。在洞口安装 LED 显示屏,实时显示洞内作业人员、机械设备的位置信息。

#### 4.3 煤系地层紧急避险系统

根据我国《煤矿洞内紧急避险系统建设管理暂行规定》和《煤矿洞内安全避险“六大系统”建设完善基本规范》以及其它煤矿洞内紧急避险有关规定的要求,针对新凉风垭隧道施工安排和人员分布实际情况,设计一套系统避难硐室,避难硐室设置在隧道 14 号横通道处。避难硐室内部包括安全防护系统、供氧系统、净化系统、降温除湿系统、环境监控系统、照明系统、通讯系统、动力保障系统、生存保障系统、排水排气系统。

#### 4.4 煤系地层压风自救系统

在隧道洞口附近设置的空压机房向隧道用风设备提供风压,同时兼做隧道内压风自救系统供风,压风自救管路同压风管路共用;压风自救系统由空气压缩机、送气管路、阀门、汽水分离器、压风自救装置组成。

#### 4.5 煤系地层段供水施救系统

在洞口建设有效容积为 200 m<sup>3</sup> 水池,水池水经净化处理向地面、隧道供水,能够满足供水施救系统的需要。供水系统由清洁水源、供水管网、三通、阀门、过滤装置及监测供水管网系统等其他必要设备组成。供水系统应具有基本的防尘供水功能、供水水源优化调度功能、过滤水源功能。供水施救系统中,主管选用 Φ100 钢管,支管选用 Φ15 钢管。

#### 4.6 煤系地层施工通信联络系统

通信联络系统由控制中心、调度台(可与控制中心一体化)、中继器(可缺省)、信号装置(电话交换机或无线基站、编解码器)、终端设备、电源、电缆、接线盒、避雷器和其他必要设备组成。通讯线路经耦合器后由正洞和平导引入正洞开挖掌子面,在隧道内及开

挖工作面、洞口调度室、值班室、压风机房、主要通风机房、爆炸材料库房、瓦斯抽放站安装 KT1017 型本安电话话机。

## 5 结论

新凉风垭隧道煤系地层施工中所采用的区域预测与工作面预测结合的瓦斯超前预测预报手段,根据煤矿的成功经验确定每一步骤预测的具体位置,对于预测有突出危险的煤层和预测没有突出危险的煤层,采用不同的布孔方式予以验证,既体现了安全,又节省了工作量;在预测孔和验证孔的布孔数量方面,也充分考虑了铁路隧道断面较煤矿巷道断面大的特点,增加了钻孔数量;实践了多煤层集中预测、集中实施消突措施、集中进行消突措施验证,取得了良好的效果,确保了工期;在消突措施方面采用区域瓦斯抽放结合工作面瓦斯排放的消突措施;另外为提高抽采效率,采用了水力压裂的增透技术,节约了时间。确保安全的六大系统,在煤矿施工中普遍采用,但在铁路隧道施工中应用的还比较少,新凉风垭隧道做了很好的尝试。将以上措施应用在新凉风垭隧道煤系地层段施工中,在确保施工安全,实现及缩短工期目标方面取得了极大成功,在今后铁路隧道设计及施工中可以借鉴。

## 6 结束语

新凉风垭隧道出口工区为煤系地层高瓦斯具突出危险工区,隧道施工工具极高风险,煤系地层段施工期间各参建单位积极配合,根据各步工序预测结果,动态调整区域及局部消突措施,聘请煤矿部门专家就煤系地层安全施工进行技术咨询,按照《煤矿洞内安全避险“六大系统”建设完善基本规范》设置六大安全防护系统,结合实际,采用水力压裂增透技术,提高了抽放效率,实现了工期目标,在施工过程中通过充分沟通,在增加投资不多的基础上,充分采纳了煤矿部门专家的一些合理化建议,例如,区域预测 K7、K8 煤层瓦斯压力未达到突出值,但在集中抽放 K4、K5、K9 时,钻孔已基本穿过了 K7、K8 煤层,再增加几个外围钻孔就可以将 K7、K8 煤层一同抽放,考虑到隧道开挖断面较大及瓦斯赋存的不确定性,施工时将 K7、K8 煤层一并列入了瓦斯抽放范围。另外,对于 K4、K5 煤层在 K5 煤层 5 m 垂距处工作面突出危险性预测时,预测 K5 煤层具突出危险性,在实施工作面消突措施时,鉴于 K4、K5 煤层均为区域预测的突出危险性煤层,且两煤层距离较近,故将 K4、K5 煤层的工作面突出危险性预测及工

作面消突措施一并实施,节省了 K4 煤层的工作面预测及消突措施的时间,确保了最终的工期目标。

参考文献:

[1] TB 10120-2002 铁路瓦斯隧道技术规范[S].  
TB 10120-2002 Technical code for railway tunnel with gas [S].

[2] 国家安全生产监督管理总局 19 号令,防治煤与瓦斯突出规定[S].  
Order No. 19 of State Administration of Work Safety, Regulations on Coal and Gas Outbursts Prevention[S].

[3] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新凉风垭隧道工程地质说明[Z]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2012.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Engineering geology description for new Liangfengya tunnel[Z]. Chengdu: China Railway EryuanEngineering Group Co., Ltd., 2012.

[4] 中铁二院工程集团有限责任公司. 新凉风垭隧道施工图设计

[Z]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2012.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Construction drawing design for new Liangfengya tunnel [Z]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2012.

[5] 王学生. 方斗山隧道揭煤施工技术[J]. 西部探矿工程, 2009, 21(3):150-152.  
WANG Xuesheng. Construction technology for cutting through coal seam in Fangdoushan tunnel [J]. West - china Exploration Engineering, 2009, 21(3):150-152.

[6] 刘汉银. 瓦斯突出隧道揭煤施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2010, 37(12):39-43.  
LIU Hanyin. Construction technology for cutting through coal seam in gas outburst tunnel [J]. Railway Construction Technology, 2010, 37(12):39-43.

(编辑:苏玲梅)

(上接第 23 页)  
置板轨道设计频率的计算精度。

4 结论

针对传统浮置板轨道模态计算方法在计算连续型浮置板轨道固有频率时的局限性,本文开展了连续型浮置板轨道模态设计方法的研究。利用线性振动理论推导了连续型浮置板轨道固有频率计算公式。通过实际算例对比,阐释了所提出设计计算方法与传统方法的区别。最后,利用有限元方法,验证了本文提出方法的准确性。结果显示,对于 20 m 长浮置板轨道,本文提出的计算方法与有限元方法的绝对误差为0.04 Hz,传统方法与有限元方法的误差为 0.49 Hz。与传统的计算方法相比,本文提出的计算方法大幅提高了模态频率设计的计算精度。

参考文献:

[1] 徐锡江,蔡文峰,姚力. 弹性支承块式无砟轨道支承块的合理埋深研究[J]. 高速铁路技术, 2013,4(3):9-12.  
XU Xijiang, CAI Wenfeng, YAO Li. Study on Rational Buried Depth of Bearing Block for Elastic Bearing Block Ballastless Track [J]. High Speed Railway Technology, 2013,4(3):9-12.

[2] 吴新利. 城市轨道交通高架桥梁减振降噪措施概述[J]. 科学技术通讯, 2004,32(3):30-32.  
WU Xinli. Review of Vibration and Noise Reduction Measures for Elevated Bridges of Urban Rail Transit [J]. KEXUE JISHU

TONGXUN, 2004,32(3):30-32.

[3] 丁德云,刘维宁,张宝才,等. 浮置板轨道的模态分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(3):61-64.  
DING Deyun, LIU Weining, ZHANG Baocai, et al. Modal Analysis on the Floating Slab Track [J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(3):61-64.

[4] 江阿兰,李建敏. 钢弹簧浮置板轨道结构模态分析[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(5):89-92.  
JIANG A'lan, LI Jianmin. Modal Analysis of Steel Spring Floating Slab Track Structure [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2016, 37(5):89-92.

[5] 耿传智,楼梦麟. 浮置板轨道结构系统振动模态分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(9):1201-1205.  
GENG Chuanzhi, LOU Menglin. Vibration Model Analysis of Floating Slab Track System [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2006, 34(9):1201-1205.

[6] 梅早临,耿传智,梅早强,等. 浮置板轨道结构振动模态分析[J]. 城市轨道交通研究, 2004, 7(5):54-56.  
MEI Zaolin, GENG Chuanzhi, MEI Zaoqiang, et al. Modal Analysis of the Floating Track Bed Vibration System [J]. Urban Mass Transit, 2004, 7(5):54-56.

[7] 李增光,吴天行. 浮置板轨道二维建模及隔振性能分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(8):93-98.  
LI Zengguang, WU Tianxing. 2-D Modelling of Floating Slab Track and Performance Analysis on Vibration Isolation [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(8):93-98.

[8] GJJ/T 191-2012 浮置板轨道技术规范[S].  
GJJ/T 191-2012 Technical Code for Floating Slab Track [S].

(编辑:刘会娟 白雪)