

文章编号: 1674—8247(2020)01—0060—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.01.013

## 铁路瓦斯隧道若干技术问题的探讨

郑伟 杨昌宇 朱勇

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**本文对比分析了铁路瓦斯隧道与煤矿矿井的差异,总结了多年来我国铁路瓦斯隧道的设计、施工经验,并结合新颁布的行业技术规范,对瓦斯区段划分、炸药类型选用、施工通风、辅助坑道工后处理、运营通风等技术问题进行了分析论证,提出针对性的建议措施,可为我国后续铁路瓦斯隧道的设计施工提供参考借鉴。

**关键词:**铁路; 瓦斯隧道; 区段; 施工通风; 炸药类型; 辅助坑道

中图分类号:U452.2<sup>+</sup>7 文献标志码:A

## Discussion on Several Technical Problems of Railway Tunnel with Gas

ZHENG Wei YANG Changyu ZHU Yong

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

**Abstract:** The differences between railway tunnel with gas and coal mine are compared and analyzed, and experiences in the design and construction of gas railway tunnels are summarized in this paper. Based on the new technical codes for railway tunnel with gas, technical problems such as division of gas sections, explosive type selection, construction ventilation, and post proposing of service gallery are analyzed and demonstrated, and specific suggestions and measures are proposed, which could provide references for the design and construction of future railway tunnels with gas in China.

**Key words:** railway; tunnel with gas; section; construction ventilation; explosive type; service gallery

据不完全统计,2000年前我国建成的铁路瓦斯隧道19座,总延长73.532 km。从2000年至2018年,国内建成瓦斯隧道250余座,总延长约720 km,大大超过了2000年以前修建的瓦斯隧道总数。我国瓦斯隧道的设计、施工多参照煤矿系统的相关规范和做法,基本保证了施工安全,也积累了一些经验,但在实际施工中也暴露出了一些问题,主要体现在施工工效低、施工成本高、管理成本高等方面,如瓦斯隧道各工区管理、火工品的选用、施工通风方式的选用、辅助坑道的设置及工后处理等。本文通过总结近年来瓦斯隧道的设计、施工经验,深入分析铁路瓦斯隧道与煤矿矿井的工程性质差别,并根据瓦斯隧道的工程特点对几个技术

标准问题进行探讨,以期在不降低安全标准的条件下,让铁路瓦斯隧道的设计、施工更有针对性、高效率性和经济性。

### 1 铁路瓦斯隧道与煤矿矿井的差别

煤矿矿井以采煤为目的,整个矿井一般全部处于含瓦斯地层中,其服务年限较长,如设计生产能力45~90万t/a的矿井,其设计服务年限为50年。煤矿矿井巷道种类繁多,按其作用和服务范围可分为开拓巷道、准备巷道、回采巷道等,空间上呈多层分布,存在的工作面数量多,且部分巷道为顺煤层布置。煤矿矿井通风系统是瓦斯防治的重要保障手段,通风巷道类

收稿日期:2020-01-08

作者简介:郑伟(1979-),男,高级工程师。

引文格式:郑伟,杨昌宇,朱勇. 铁路瓦斯隧道若干技术问题的探讨[J]. 高速铁路技术,2020,11(1): 60-64.

ZHENG Wei, YANG Changyu, ZHU Yong. Discussion on Several Technical Problems of Railway Tunnel with Gas[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 60-64.

型众多,通风网络复杂。总体来说,煤矿矿井长时间、多层次、多采掘面的需要,使矿井巷道具有种类多、空间分布错综复杂、巷道之间互联互通、作业工作面数量多、工作年限长等特点,煤矿矿井巷道如图1所示。

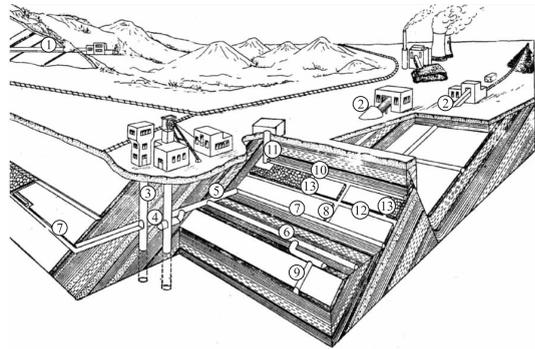


图1 煤矿矿井巷道示意图

1. 平硐; 2. 斜井; 3. 立井; 4. 井底车场; 5. 石门; 6. 主要运输大巷;  
7. 煤层大巷; 8. 上山巷道; 9. 下山巷道; 10. 区段回风巷; 11. 风井;  
12. 区段运输巷; 13. 采煤工作面

铁路隧道以穿越煤层为主,项目前期选线时,通过区域绕避、纵坡调整等手段,尽量避开煤系地层和煤层,当无法避免时,尽量以大角度、短距离快速穿越煤系地层。因此,铁路隧道实际上往往只有部分段落位于煤系地层中,其余大部分段落都位于不含煤和瓦斯的地层中,铁路隧道真正在含瓦斯地层中施工的时间和长度是有限的。铁路隧道多为单洞隧道,少数为单洞带平导或分修双洞,巷道种类和分布较煤矿矿井巷道简单且少,在含瓦斯地层中施工的作业面少,相互之间的影响也小,隧道施工通风系统相对简单,风流途径明确。

煤矿矿井和铁路隧道在工程性质、工程时间、巷道分布、通风系统等方面均存在着较大差别,具体如表1所示。煤矿自建井开始,各工作面基本均处于瓦斯环境中,而铁路瓦斯隧道则不一定,可能只是在局部瓦斯地层段落中施工时才处于瓦斯环境中。

表1 煤矿矿井与铁路隧道对比表

工程名称	煤矿矿井	铁路隧道
工程目的	采煤	短距离通过瓦斯地层
瓦斯地层分布	整个矿井	局部段落
瓦斯地层工作时间	矿井全寿命周期	短
巷道分布	多层、多类型、网络复杂	单一、简单
瓦斯工作面	多个	少
通风系统	系统庞大,风流途径长且复杂	系统简单,风流途径明确

由此可见,铁路瓦斯隧道通过含瓦斯地层时,其施工与煤矿矿井施工具有相似性,可借鉴煤矿系统做法;

但在非瓦斯地层施工时,是否也按瓦斯地层的施工的要求来办理,就需要进一步探讨了。只有根据铁路瓦斯隧道和煤矿矿井的差别,并结合铁路隧道本身的特点,才能使采用的技术措施更具有科学性、合理性、针对性和经济性。

## 2 瓦斯工区区段划分

1994年前,铁路隧道设计施工多参照煤矿行业的做法,整个隧道为瓦斯隧道,且未对隧道进行瓦斯工区和非瓦斯工区划分。

1994年颁布实施的《铁路瓦斯隧道技术暂行规定》对隧道各工区进行了划分,并明确规定:“瓦斯隧道设计时,应根据地质勘测资料,结合工点具体情况,合理划分工区。凡勘探取样有瓦斯含量的工区为含瓦斯工区,无瓦斯含量的工区为不含瓦斯工区”,但并未对瓦斯工区进行分级。

2002年颁布的《铁路瓦斯隧道技术规范》就瓦斯隧道工区分级作出了明确的规定:瓦斯隧道工区分为非瓦斯工区、低瓦斯工区、高瓦斯工区、瓦斯突出工区共四类。

从铁路瓦斯隧道技术发展历程来看,在充分学习借鉴煤矿行业技术基础上,总结众多铁路瓦斯隧道修建经验,对瓦斯隧道的认识逐渐提升,才有了从瓦斯隧道到瓦斯工区再到不同等级瓦斯工区的逐步认识。但随着我国铁路建设的快速发展,单个瓦斯工区长度的不断加长,单一工区中煤系地层局部出现的情况越来越多,整个工区按煤系地层的瓦斯等级来进行设计及施工,不区分瓦斯地段和非瓦斯地段是极不合理的,既加大了工程投入,减缓了施工进度,也没有凸显含瓦斯重点段落的安全性和重要性。

因此,根据瓦斯地层分布情况、瓦斯等级、非瓦斯地层与瓦斯地层的关系把瓦斯工区划分为若干区段是很有必要的,也是更接近工程实践的一种体现。通过区段划分,对各区段的施工过程管理、设备配置、工法及炸药等进行区别化处理,也体现了精细化设计、施工和管理的理念。

瓦斯区段在施工中是一个动态调整的过程,如图2所示。工区在进入第一个瓦斯区段前可按非瓦斯区段进行管理,作业机械设备可采用非防爆型,炸药可采用普通岩石乳化炸药;进入瓦斯区段后则按瓦斯区段进行管理,根据瓦斯区段等级采用相应的作业机械设备和火工品;在施工通过所有瓦斯区段后,对已施工段瓦斯封闭效果进行检验,回风流中无瓦斯或瓦斯浓

度很低时,后续段落可按非瓦斯区段进行管理,采用相应的作业机械设备和火工品。瓦斯区段的范围要结合既有地质资料及施工期中的超前地质预报结果适时进行调整。成贵、渝黔等多个铁路项目瓦斯隧道的施工经验证明,在确保持续通风、瓦斯监测等条件下,瓦斯工区中非瓦斯地段的施工机械、钻爆作业按普通隧道实施是可行的,在保障安全的同时,施工工效也得到了提高。

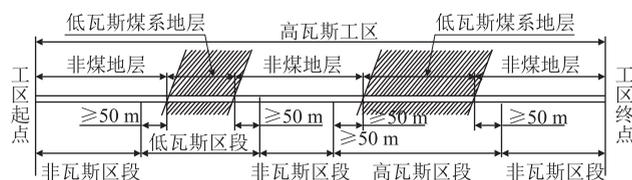


图2 瓦斯工区区段划分示意图

### 3 炸药类型选用

瓦斯爆炸是热—链式反应,瓦斯在空气中遇火引起爆炸的浓度范围称为瓦斯爆炸界限,瓦斯爆炸界限为5%~16%,瓦斯浓度为9.5%时,由于瓦斯与氧气完全反应使其爆炸威力最大。瓦斯爆炸界限可因热源温度、压力以及煤尘、其他可燃气体、惰性气体的混入而改变。如在强火源中,其爆炸界限为2%~75%,最佳爆炸浓度为0.85%~10%。除瓦斯浓度、引火温度、氧气浓度外,瓦斯爆炸的另一必要条件是加热时间大于反应开始至发火的感应时间。瓦斯爆炸的感应时间与压力、加热温度成反比,与瓦斯浓度成正比。一般炸药爆破后可达4500°高温,但只要其作用时间(一般为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-2}$ s)不超过感应时间就不会引起瓦斯爆炸。因此,瓦斯环境下应尽量缩短瓦斯被加热的时间,控制爆温和爆热。

按TB 10120-2002《铁路瓦斯隧道技术规范》第5.0.3条:“瓦斯工区的爆破作业必须采用煤矿许用炸药”。多年来铁路瓦斯隧道设计施工均按此要求进行。煤矿许用炸药较普通岩石乳化炸药在猛度和爆力方面都存在一定的差异(如表2所示),在相同爆破方式和爆破效果时,采用煤矿许用炸药的消耗量将是普通炸药的1.33倍,且煤矿许用炸药价格又较普通乳化

表2 煤矿许用炸药与普通乳化炸药性能对比表

炸药名称	猛度/mm	爆速/(m/s)	爆力/ml
普通乳化炸药	16	4 200	280
二级煤矿许用炸药	12	4 200	220
三级煤矿许用炸药	12	4 200	210

炸药高约280元/t,因此造成了瓦斯工区施工成本的增加和极大的浪费。

考虑到铁路隧道和矿井的本质差别,并综合瓦斯爆炸的必要条件,铁路瓦斯隧道在施工中,可根据不同的区段选用经济、安全的炸药类型。非瓦斯区段不具备瓦斯爆炸的必要条件,因此可采用更为经济的普通岩石乳化炸药。但必须做好两个方面的工作,一是超前地质预报工作,探明工作面前方地层中是否含有瓦斯;二是做好瓦斯监测和通风工作,保证开挖面附近瓦斯浓度低于0.5%。对于瓦斯区段,在瓦斯环境下爆破关键是控制爆温和爆热,采用煤矿许用炸药爆破后,氧平衡接近于0,无灼热固体产物,爆炸反应完全,爆温和爆热均能较好地受到限制。目前,降低爆温、爆热除采用煤矿许用炸药外,还可通过改变封泥材料的方式(如采用水炮泥)来实现。某工程试验实际效果表明,采用水炮泥可降低爆温、缩短爆炸火焰延续时间,减少引爆瓦斯的可能,并能降尘和减少有害气体。Ⅱ级围岩中水压爆破单位炸药消耗减少 $0.08 \text{ kg/m}^3$ ,降低16%;炮眼利用率提高8%,实际进尺增加、爆渣块度减小、抛距缩短、通风时间缩短,煤尘浓度减低50%, $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 含量分别减少35%、45%,每方节约1.97元。因此采用水炮泥替代煤矿许用炸药具有一定的可行性,但需进一步对相关标准及可靠性进行论证。

### 4 施工通风

对瓦斯隧道而言,瓦斯监测和施工通风是保障安全的根本,将洞内瓦斯浓度稀释至0.5%以下是基本要求。一直以来,高瓦斯隧道不论隧道长短均要求采用巷道式通风,一方面需增设(或利用)平导,增大了工程量,另一方面平导本身也有可能穿越煤系地层,增加了风险因素。实际上不管是压入式通风还是巷道式通风,对于开挖工作面来说其通风是一样的,新鲜风通过风管压入送至开挖面以稀释瓦斯,风量的保证更大程度上取决于通风的长度和风管的百米漏风率。

除与常规隧道施工相同,按工作人数、最小风速、爆破排烟、洞内作业机械分别计算需风量外,瓦斯隧道还需考虑稀释涌出瓦斯所需的风量,并取其中最大值;通过计算采用压入式通风时,各不同断面非瓦斯隧道按Ⅱ级围岩全断面、Ⅳ级围岩台阶法施工时所需的最大风量,并按此风量反算能稀释到0.5%浓度以下的绝对瓦斯涌出量。长2000m的单双线隧道压入式通风量,如表3所示。

表3 L=2 000 m的单双线隧道压入式通风量表

时速 (km/h)	线别	压入通风 长度 /m	围岩级别	开挖断面 面积 /m <sup>2</sup>	需风量/(m <sup>3</sup> /min)					能稀释的 绝对瓦斯 涌出量 (m <sup>3</sup> /min)
					按洞内同时 工作的最多 人数计算	按满足洞内 允许最小风 速0.25 m/s 计算	按炸药消 耗量计算	按柴油机 的废气污染 计算	需风量	
140	单线	2 000	II	55.42	225	489	761	1 806	1 806	5.64
			IV上台阶	30.31	225	510	286	1 806	1 806	5.64
140	双线	2 000	II	112.20	300	981	1 542	1 806	1 806	5.64
			IV上台阶	65.84	300	993	622	1 806	1 806	5.64
160	单线	2 000	III	62.82	225	550	863	1 806	1 806	5.64
			IV上台阶	31.45	225	560	297	1 806	1 806	5.64
160	双线	2 000	III	129.84	300	1 137	1 784	1 806	1 806	5.64
			IV上台阶	70.34	300	1 155	664	1 806	1 806	5.64
250	双线	2 000	II	136.52	300	1 211	1 876	1 806	1 876	5.86
			IV上台阶	79.70	300	1 249	753	1 806	1 806	5.64
350	双线	2 000	II	135.71	300	1 206	1 865	1 806	1 865	5.83
			IV上台阶	84.86	300	1 238	802	1 806	1 806	5.64

由表3可知,绝对瓦斯涌出量不是所需风量的控制因素,大多数情况下,洞内施工作业机械废气为需风量控制因素,当一次开挖断面较大时,爆破排烟需风量为控制因素。对于绝对瓦斯涌出量小于 $5\text{ m}^3/\text{min}$ 的高瓦斯工区,通风长度小于2 000 m时,按常规隧道施工所需的风量均能将瓦斯浓度稀释到0.5%以下,故可采用独头压入式通风。此时风管百米漏风率为1%。理论上,风管百米漏风率越小,保证通风效果的独头压入式通风的距离越长。但现实情况中,受风管材料、风管接缝质量、风管破损、施工管理等因素的影响,风管漏风风量损失严重,开挖面实际风量与理论计算风量出入较大。而采用巷道式通风可大幅缩短风管长度,减少漏风,更能保证开挖面所需风量。现场调研结果表明,独头压入式通风长度在2 500 m以下时,能保证洞内风量,确保施工环境良好。因此对瓦斯隧道而言,通风长度小于2 000 m时,采用压入式通风是可行的。不论是压入式通风还是巷道式通风,减少风管接缝、保证接缝质量、避免破损、加强施工管理,从而降低风管百米漏风率均是保证施工通风的关键。

## 5 辅助坑道工后处理

瓦斯隧道的辅助坑道首先应避免穿越煤系地层,以减少瓦斯工区的数量。当不可避免时,辅助坑道洞身穿越煤系地层段施工期间的瓦斯防治措施(包括瓦斯检测和通风)一般与正洞相同。TB 10120-2019《铁路瓦斯隧道技术规范》中对辅助坑道的瓦斯封闭

和设防措施均有相应的规定:“高瓦斯、煤与瓦斯突出区段应设置复合式衬砌”、“运营期间予以利用的辅助坑道,瓦斯地段设防标准应与正洞一致”。

辅助坑道按工后功能分为予以利用和不予以利用两种,不予以利用的辅助坑道应按规范要求封堵;予以利用的辅助坑道应按规范要求配备运营维修管理所需的瓦斯检测仪表和通风设备。

运营期间作为防灾疏散救援的辅助坑道,与正洞间设置有防护门。通常情况下防护门是关闭的,当交叉口为高端时,瓦斯易聚集在交叉口段,一旦瓦斯浓度超标时,需通过辅助坑道内设置的固定通风设备进行通风,同时开启防护门,将交叉口聚集的瓦斯吹散或稀释。因此,作为防灾疏散救援的辅助坑道首先应选择不通过含瓦斯地层,当不可避免时,宜优先选择瓦斯不易聚集,有自然排放条件的斜井。

运营期间作为排水通道的辅助坑道,一般为平导或者横洞,此时辅助坑道与正洞交叉口均为高端,若对交叉口段进行全封堵,则易形成瓦斯易聚集区。针对这类问题可采用以下解决办法:①交叉口段不封堵,辅助坑道与正洞连通,瓦斯地段设防标准与正洞一致。辅助坑道本身工后瓦斯的逸出量少,从辅助坑道进入正洞的瓦斯非常有限,加之正洞与辅助坑道连通,列车的活塞风作用也可对正洞及辅助坑道内的瓦斯进行稀释;②当辅助坑道交叉口段附近有设置竖井条件时,为防止辅助坑道内瓦斯进入正洞,可将交叉口进行封堵,并于辅助坑道内设置通风竖井,形成瓦斯自然排放通道,通风竖井如图3所示。③若无设置通风竖井条件,

又不允许辅助坑道内瓦斯进入正洞,则应对交叉口进行封堵,在辅助坑道内设置通风系统,通过固定通风管路压入新鲜风将交叉口段聚集的瓦斯吹散稀释,管理通风如图4所示。实际运用中可根据工后辅助坑道瓦斯逸出量、地形条件、通风条件进行综合比选。

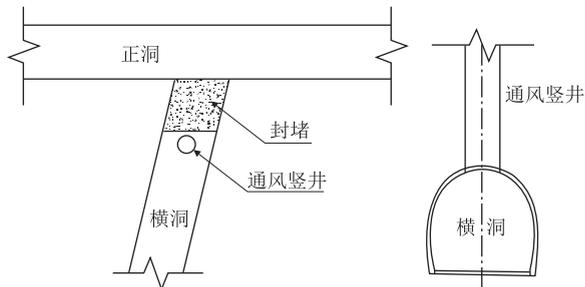


图3 通风竖井示意图

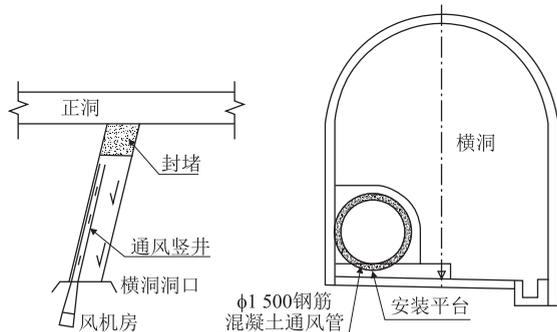


图4 管路通风示意图

## 6 运营通风

铁路瓦斯隧道运营通风如何设置是一个长期困扰设计人员的问题,设计根据开挖面爆落煤块瓦斯涌出量 $Q_1$ 、新爆落煤壁瓦斯涌出量 $Q_2$ 和喷混凝土地段洞壁瓦斯涌出量 $Q_3$ 之和,即绝对瓦斯涌出量 $Q_{\text{绝}}$ 来确定瓦斯隧道等级;施工时根据实测回风流的风速和瓦斯浓度来计算绝对瓦斯涌出量。隧道建成后瓦斯涌入主要考虑三个方面的因素,一是建筑材料本身在实验室试件和现场实际施工时的性能指标差异;二是瓦斯封闭系统长时间在软弱围岩条件下工作,结构劣化后瓦斯沿二衬裂缝、瓦斯引排管路等涌入;三是施工质量问题致使瓦斯从结构缝处等薄弱环节涌入。

规范要求运营期间,瓦斯浓度在任何时间、任何地点都不得大于0.5%,这比煤矿系统要求的1%浓度更为严格。TB 10120-2002《铁路瓦斯隧道技术规范》没有明确什么条件下设置运营通风,只要求当隧道内瓦斯浓度达到0.4%时,必须启动风机进行通风,言下之意是所有瓦斯隧道均要设置运营通风系统,当浓度

超标时则应启动通风系统,这是极不经济合理的。TB 10120-2019《铁路瓦斯隧道技术规范》第6.1.3条规定:“瓦斯突出隧道应设置运营机械通风,其余瓦斯隧道应根据线路条件、自然环境、瓦斯封闭效果、运营维护模式等综合确定”。此规定更加合理,更符合现场实际情况。运营期间瓦斯隧道内的瓦斯浓度是由多因素决定的,瓦斯隧道的运营通风应考虑隧道长度、线路坡度和洞口高差、隧道内瓦斯区段位置分布、瓦斯区段长度和瓦斯等级、建设期间的瓦斯封闭效果、辅助坑道设置情况、营维护模式等主要因素。但各种因素到底有多大影响,很难进行定量分析的,可通过对各因素进行等级划分,并按一定的权重,采用综合得分的方式来评判瓦斯隧道在运营期间设置通风系统的必要性。另外还可在隧道建成后,通过实测洞内瓦斯浓度,并考虑一定的劣化影响因素来评判是否设置运营通风系统。如成贵铁路隧道建成后,曾委托第三方进行洞内瓦斯检测,全线所有隧道在拱顶以下25 cm处均未检测到瓦斯,浓度为0,仅在个别隧道的几处施工缝贴近二衬内缘处检测到有瓦斯溢出。这说明:①瓦斯隔离层和二次衬砌对瓦斯封闭有效;②隧道建成后洞内环境不利于瓦斯聚集,很多隧道建成后洞内自然风速可达1~2 m/s。因此,瓦斯隧道运营通风问题仍需进一步开展研究,以达到既保证安全又不浪费投资的目的。

## 7 结论

本文通过对比分析煤矿矿井与铁路瓦斯隧道的差异,对瓦斯隧道的几个关键技术问题进行分析,得出以下结论:

(1)铁路瓦斯隧道与煤矿矿井存在巨大差异,可在借鉴煤矿行业瓦斯防治技术的基础上,结合铁路本身特点,形成一套安全、经济、合理的瓦斯隧道设计、施工技术体系。

(2)瓦斯隧道分区段进行管理是铁路瓦斯隧道技术进步的体现,也是精细化设计施工的体现,对瓦斯防治指明了重点段落,设计施工更有针对性,施工中根据超前地质预报成果进行动态调整。

(3)瓦斯隧道压入式通风距离控制在2500 m是可行的,风管长度和风管百米漏风率是确保通风效果的关键,当通风距离过长时,可采用巷道式通风缩短风管长度,减少漏风率。

(4)瓦斯隧道非瓦斯区段采用普通岩石乳化炸药是可行的,但应在超前地质预报探明开挖面前方地层

(下转第94页)