

# 铁路瓦斯隧道运营通风与监控联动研究

## Research on Linkage of Ventilation and Monitoring in Railway Gas Tunnel Operation

曾志斌<sup>1</sup> 曾卓<sup>2</sup>

Zhibin Zeng<sup>1</sup> Zhuo Zeng<sup>2</sup>

1. 四川矿兴科技发展有限公司 中国·四川 成都 611731

2. 中国移动通信集团有限公司(成都产业研究院) 中国·四川 成都 611731

1. Sichuan Kuangxing Technology Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611731, China

2. Chengdu Industrial Research Institute Branch of China Mobile Communication Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611731, China

**摘要:** 无论是煤层气、天然气、页岩气地层,瓦斯都以一定压力形式存在,由于瓦斯隧道混凝土衬砌本体中的细小孔隙和“三缝”等缺陷的存在,瓦斯渗入建成隧道成为一种常态,这对铁路运营的安全威胁极大,现有运营通风设计存在“大马拉小车”。为此,论文对有效的瓦斯监控及机械通风联动进行了认真研究,提出了经济、安全、有效的监控与通风联动方案,为未来营运瓦斯隧道的通风设计提供了参考。

**Abstract:** Whether it is coal-bed methane, natural gas, shale gas formation, gas exists in the form of a certain pressure. Due to the existence of small pores and “three joints” and other defects in the concrete lining body of gas tunnel, gas penetration into the built tunnel has become a normal state, which poses a great threat to the safety of railway operation. There is a “big horse pull small car” problem in the existing operation ventilation design. In this paper, the effective gas monitoring and mechanical ventilation linkage are seriously studied, and the economic, safe and effective monitoring and ventilation linkage scheme is proposed, which provides a reference for the ventilation design of gas tunnels in the future.

**关键词:** 瓦斯隧道; 监控; 联动

**Keywords:** gas tunnel; monitoring; linkage

**DOI:** 10.12346/etr.v4i1.5166

## 1 引言

近年来,中国铁路基础设施建设快速推进,很多线路选择不可避免地穿越含煤层气、天然气、页岩气地层,瓦斯隧道数量越来越多。这些隧道在施工过程中瓦斯压力被释放,但建成后,瓦斯被隧道支护结构所封闭,使原来已卸压的瓦斯压力又得以回升,这样瓦斯在渗透压力的作用下将向隧道内渗透。瓦斯渗入隧道后,对隧道的运营安全危害极大,当通风不能有效排除隧道内瓦斯,瓦斯积聚到爆炸界限范围5%~16%内,在电气和机械明火下容易发生爆炸,因此《铁路瓦斯隧道技术规范》要求:“瓦斯隧道在运营中,瓦斯浓度在任何时间、任何地点都不得大于0.5%<sup>[1]</sup>”。控制已经渗入运营隧道的瓦斯浓度指标,唯一的办法是通风,将瓦斯全

部或部分排除隧道,将其控制在安全允许范围内。论文以铁路隧道常用的纵向通风方式为例,对瓦斯隧道运营通风与监控联动进行了研究。

## 2 瓦斯渗入隧道情况分析

铁路瓦斯隧道运营通风主要目的是将渗入建成隧道的瓦斯及时有效地排出隧道外,不在隧道内形成积聚。渗入建成隧道的瓦斯通道往往是我们施工中二衬施工缝或变形缝等薄弱环节,无论是煤层瓦斯还是天然气、页岩气瓦斯,能够突破二衬施工缝或变形缝进入隧道,应该都有很强的补给源,通常保持一个相对稳定的量持续不断地渗入隧道内。随着营运时间的推移,瓦斯渗入量可能随着二衬施工缝或变形缝的增大而增大。

【作者简介】曾志斌(1972-),男,中国四川成都人,本科,高级工程师,从事隧道通风、瓦斯防治的检测与科研工作。

基于瓦斯密度小于空气密度的原因：①当瓦斯从隧道顶部涌出时，由于瓦斯浮力的作用，瓦斯与空气难以混合，断面上瓦斯分布不均匀，易出现瓦斯在顶部积聚分层现象，上部瓦斯浓度高，下部瓦斯浓度低。②壁面涌出的瓦斯在浮力与风流的双重作用下，沿侧壁向上和风流方向向两个方向运移，在瓦斯涌出点顶部有小范围的高浓度瓦斯分布，段面侧壁和顶部附近瓦斯浓度比中心区域高。③当瓦斯从隧道底部涌出时，在浮力作用下上浮过程中与空气混合，断面上瓦斯浓度分布均匀，不容易产生积聚现象<sup>[2]</sup>。

进入隧道的瓦斯容易积存于拱顶部位。在风速较小的情况下，隧道顶部会形成层流，瓦斯就积存在风流中的顶部层流带，不易排出。在风速较大的情况下，仅仅表现在渗入点的段面顶部附近小范围能检测到高浓度瓦斯。表1为成贵铁路隧道建成初期检测数据。

表1 成贵铁路隧道建成初期检测数据

隧道名	点号	出现瓦斯的施工缝里程	最高浓度	拱顶以下25cm处浓度
高坡	1	DK343+346	15.00%	0
	2	DK343+358	17.00%	0
	3	DK343+380	1.00%	0
	4	DK343+400	0.30%	0
	5	DK343+435	0.38%	0
	6	DK344+700	0.20%	0
	7	DK344+727	0.70%	0
	8	DK344+770	1.10%	0
	9	DK344+785	0.70%	0
	10	DK344+830	10%	0
	11	DK344+835	14%	0
	12	DK344+845	57.40%	0.04%
	13	DK344+870	5.70%	0
	14	DK344+880	2.62%	0
	15	DK344+905	65%	0
观音山	1	DK410+279	0.14%	0
	2	DK410+471	5.20%	0
	3	DK410+482	42.00%	0.04%
	4	DK410+494	3.20%	0
	5	DK411+409	28.60%	0
	6	DK411+464	32.00%	0
	7	DK411+474	20%	0
	8	DK411+519	35.60%	0.02%

### 3 隧道中风速及风向

隧道中风流的流动动力来自三个方面：自然风、列车运行形成的活塞风、机械通风。从某个时间节点来说，风流的方向与速度本质上是自然风、活塞风、机械通风三种通风动力共同作用的结果。

在自然风、活塞风、机械通风三种通风动力共同作用下，能完成一次全隧换气通风将有毒有害气体有效排出洞外的时间段才是我们关注的重点，对于风流方向，从目的导向看，不是我们关注的重点。

活塞风引入新鲜空气是其通风作用的表现，每次形成的新风段长度则是通风能力的衡量，较大的阻塞比引入较长的新风段长度，对于一定的隧道长度，新风段长度为一定值而与行车速度无关。活塞风通风原理是置换通风，对于不考虑自然风影响的单行隧道，多组列车产生的各次新风段长度是沿隧道纵向顺序推进的，这样才可能完成全隧道的一次换气通风<sup>[3]</sup>。

由于列车运行是定时的、间断的，因此活塞风的作用具有周期性。对于双向行驶的隧道，如隧道长度大于引入的新风段长度，不能实现一次性换气通风，不同方向运行的列车产生的活塞风具有相互抵消作用，隧道中部的有毒有害气体难以排出，会在隧道中随活塞风往返移动，进而形成积聚。

因此，对于引入的新风段长度小于隧道长度的隧道，活塞风不能有效排除隧道内的有毒有害气体；在活塞风间隙，通过机械通风、自然风压在间隙时间（特别是天窗时间）内将洞内有毒有害气体有效排出洞外才是关键。

《铁路瓦斯隧道技术规范》要求：“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、自然环境条件、瓦斯封闭效果、运营维护模式等综合确定<sup>[4]</sup>”。

上述规定意味着除瓦斯突出隧道，其他瓦斯隧道是否设置运营机械通风需要看自然风、活塞风共同作用下隧道内的瓦斯浓度情况而定。在这里我们充分利用了自然风、活塞风，没有关心隧道内的风流方向。

对于瓦斯突出隧道以及仅靠自然风、活塞风无法解决隧道内瓦斯浓度居高不下的隧道，就必须设置运营机械通风。

表2、表3为成贵铁路两个隧道建成未通车为期一周的风向、风速测定情况。

以下数据是在未通车、未采取机械通风状况下测定的，表明自然风压的大小、方向是不确定的，随着天气及季节的变化而变化，风向转换过程我们没有检测到，但可以推测在极端情况下风流可能停止不动。

客观存在的自然风压在TB 10068—2010《铁路隧道运营通风设计规范》中“按对隧道通风不利的情况考虑，当缺乏资料时，单线隧道内自然风速可按1.5m/s计算，双线隧道内自然风速可按2m/s计算”<sup>[1]</sup>。也就是说，在自然风不利机械

通风时,机械风压同时克服隧道阻力和自然风压,按计算的需风量进行通风;在自然风有利机械通风时,机械风压和自然风压共同克服隧道阻力,实际供风量远大于计算的需风量。

表 2 高坡隧道

序号	时间	风速	风向
1	2019年6月19日 白班	0.5m/s	成都→贵阳
2	2019年6月19日 夜班	0.4m/s	成都→贵阳
3	2019年6月20日 白班	0.6m/s	成都→贵阳
4	2019年6月20日 夜班	0.4m/s	成都→贵阳
5	2019年6月21日 白班	0.8m/s	贵阳→成都
6	2019年6月21日 夜班	0.6m/s	贵阳→成都
7	2019年6月22日 白班	0.4m/s	成都→贵阳
8	2019年6月22日 夜班	0.3m/s	成都→贵阳
9	2019年6月23日 白班	0.4m/s	成都→贵阳
10	2019年6月23日 夜班	0.4m/s	成都→贵阳
11	2019年6月24日 白班	0.4m/s	成都→贵阳
12	2019年6月24日 夜班	0.3m/s	成都→贵阳
13	2019年6月25日 白班	0.5m/s	成都→贵阳
14	2019年6月25日 夜班	0.4m/s	成都→贵阳

表 3 观音山隧道

序号	时间	风速	风向
1	2019年6月26日 白班	0.9m/s	成都→贵阳
2	2019年6月26日 夜班	0.8m/s	成都→贵阳
3	2019年6月27日 白班	0.9m/s	成都→贵阳
4	2019年6月27日 夜班	0.8m/s	成都→贵阳
5	2019年6月28日 白班	0.9m/s	成都→贵阳
6	2019年6月28日 夜班	0.7m/s	成都→贵阳
7	2019年6月29日 白班	0.8m/s	成都→贵阳
8	2019年6月29日 夜班	0.8m/s	成都→贵阳
9	2019年6月30日 白班	0.8m/s	贵阳→成都
10	2019年6月30日 夜班	0.6m/s	贵阳→成都
11	2019年7月1日 白班	0.9m/s	贵阳→成都
12	2019年7月1日 夜班	0.6m/s	贵阳→成都
13	2019年7月2日 白班	0.5m/s	贵阳→成都
14	2019年7月2日 夜班	0.5m/s	贵阳→成都

能否考虑需要设置机械通风的隧道也有效利用自然风压呢?如果我们不考虑固定隧道内的风流方向,根据自然风的方向来确定隧道内通风风流流向(机械通风的动力方向),始终保持机械通风风向与自然风风向一致,用自然风压和射流风机风压共同来克服隧道阻力,按计算需风量进行通风。这样我们的机械通风设备能力、机械通风的供电负荷将大大

降低,即减少建设的投资成本,也降低铁路运营成本。

## 4 营运通风与监控联动

营运通风与监控联动是设置机械通风的隧道有效利用自然风压的关键。

我们的目的是将隧道内的有毒有害气体顺利排出洞外,使洞内的瓦斯浓度在《铁路瓦斯隧道技术规范》的规定值之下;无需固定隧道内的风流流向。

上述通风方案的实现:

通风设计中先以瓦斯溢出量作为依据计算需风量;考虑极端情况下,自然风压为0,按照需风量计算隧道阻力,然后根据通风总阻力及射流风机参数进行风机选型和确定射流风机数量。

为保证射流风机与自然风风向一致,射流风机选择双向射流风机。

安全监控系统设计中除按《铁路瓦斯隧道技术规范》规定配备必需的瓦斯传感器外,另配隧道双向风速传感器、每个射流风机配开停传感器,在线路工务调度中心能实时展示隧道内监测点的瓦斯浓度、隧道风速、风向、射流风机开停状态。

由隧道综合监控系统根据瓦斯浓度、隧道风速、风向、射流风机开停状态以及列车是否运行在隧道内等情况,下达指令启停风机及控制风机的风向;如有多台射流风机,可以分组控制其启停及风机的风向。先利用自然风,在自然风不能满足计算通风时,根据实时风速补充机械风压(选择性开启风机数量)。

射流风机的风向、启停实现可通过监控系统485控制信号接入射流风机PLC控制系统实现。

考虑列车通过隧道的高风速对射流风机叶片的影响,可加入红外对射传感器监控列车进出隧道情况,列车在隧道内运行时间段内暂停射流风机的运转,从而保护射流风机。

各隧道营运通风与监控联动通过监控系统分站独立自动运行,在初始设定完成后不需要人为干预。一条铁路线路的多个瓦斯隧道可通过铁路的专用线路形成一套综合安全监控系统,在工务调度中心集中展示各隧道内监测点的瓦斯浓度、隧道风速、风向、射流风机开停状态等信息。

综合监控系统联动机械通风设备的原理如图1所示。

## 5 实际案例分析

某隧道全长7328m,为浅层天然气瓦斯,隧道当量直径: $D=4Ar/s=4 \times 100/39.6=10.1m$ 。隧道竣工后洞内为期7d的检测结果:隧道内拱顶以下25cm最高瓦斯浓度0.08%,风速平均为0.4m/s,最大1.2m/s,风向不固定。

在排除运营通风系统与防灾通风系统兼顾可能性后,采用纵向式通风。

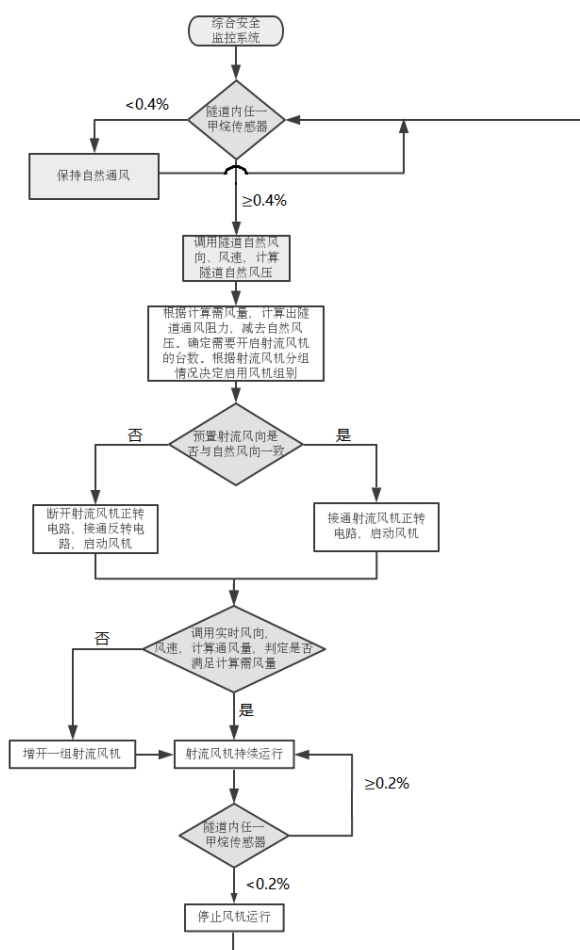


图1 综合监控系统联动机械通风设备的原理

本隧为浅层天然气瓦斯，不能按照煤层瓦斯溢出量计算运营通风需风量，运营通风应能及时排出洞内有害气体，并保证洞内风速不低于 1m/s（《铁路隧道运营通风设计规范》5.3.3）。按照固定风向设计，所需风速  $V=1\text{m/s}$ ；所需风量  $Q=VS=1\times 100=100\text{m}^3/\text{s}$ 。

隧道内自然风按对隧道通风不利的情况考虑，自然风速按 2m/s 计列。

需要风机台数：

①隧道阻力及自然风压：

$$\xi_n = 1.5 + \frac{\lambda L_T}{d} = 1.5 + (0.021 \times 7328) / 10.1 = 16.74$$

$$P_\lambda + P_\xi = \xi_n \frac{\gamma}{2} V_e^2 = 16.4 \times 1.225 / 2 \times 1^2 = 10.05\text{Pa}$$

$$P_n = \xi_n \frac{\gamma}{2} V_n^2 = 16.4 \times 1.225 / 2 \times 2^2 = 40.2\text{Pa}$$

②经比较，拟采用 SLFJ-100 型射流风机，出口流速 35m/s，轴向推力 1080N，电机功率 30kW。风机中心距离壁面 0.96m，由  $Z/D_j=0.86/1=0.86$  查得射流损失系数  $K_j=1.162$ 。

③单台风机压力：

$$V_j = 35\text{m/s}$$

$$F_j = \pi / 4 \times 1^2 = 0.7775\text{m}^2$$

$$\phi = F_j / F = 0.7775 / 100 = 0.007775$$

$$\psi = V_j / V_j = (1+2) / 35 = 0.0857$$

$$P_j = \frac{\gamma}{g_n} V_j^2 \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right) (1-\psi)^2 \frac{1}{K_j}$$

$$= 1.225 \times 35^2 \times 0.007775 / (1-0.007775) \times (1-0.0857)^2 / 1.162$$

$$= 8.5\text{Pa}$$

④需要风机台数：

$$n = (P_\lambda + P_\xi + P_n) / P_j = (10.05 + 40.2) / 8.5 = 5.91$$

需用射流风机 6 台，总功率 180kW。

若采用论文前述利用自然风压的观点，实现运营通风与监控联动，则完全不用考虑自然风压的阻力作用，最不利的情况是自然风压为 0，则：

需要风机台数：

$$n = (P_\lambda + P_\xi) / P_j = 10.05 / 8.5 = 1.18$$

需用射流风机 2 台，总功率 60kW。

两相比较：均能保证有效排除瓦斯，采用利用自然风压方案需增加双向风速传感器，射流风机选用双向射流风机，实现射流风机与监控系统联动。但可以大大减少射流风机数量以及相应的电力供给设备，减少运营初期的设备投入，同时降低运营能耗成本。

## 6 结语

①采用纵向通风方式的瓦斯隧道运营通风不需要固定风向，可利用自然风压，在自然风不能满足计算通风量时，再采用机械通风作为补充。

②机械通风设备的选型按照自然风为 0 状态作为选型依据。

③安全监控系统与机械通风设备的联动，在初始设定完成后不需要人为干预。

④在安全监控系统与机械通风设备的联动自动运行状态下，可以实现列车运行于隧道内时暂停风机运转，从而有效保护通风设备。

⑤采用监控系统联动机械通风能充分利用自然风压，减少风机配备数量及其电控设备、供电线路，节约投资；在保证有效通风的前提下，降低运营能耗成本。

## 参考文献

[1] TB 10120—2019 铁路瓦斯隧道技术规范[S].北京:中国铁道出版社,2019.

[2] 高建良,王春霞.巷道中瓦斯涌出位置对瓦斯分布的影响规律模拟[J].经济管理与安全环保,2018,30(6):109-112.

[3] 李炎,高孟理,周鸣镝,等.铁路隧道列车活塞风的理论研究与计算方法的探讨[J].铁道学报,2010(6):140-145.

[4] TB10068—2010 铁路隧道运营通风设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2020.